



TITLE:

穀物乾燥機に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

山下, 律也

CITATION:

山下, 律也. 穀物乾燥機に関する研究. 京都大学, 1967, 農学博士

ISSUE DATE:

1967-07-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r1051>

RIGHT:

穀物乾燥機に関する研究

1967

山下律也

穀物乾燥機に関する研究

1967

山下 律也

穀物乾燥機に関する研究

目 次

緒 言	1
第 1 編 穀物乾燥とその特性	2
第 1 章 穀物乾燥機	2
第 1 節 穀物乾燥機の種類と特徴	2
(1) 通 気 乾 燥	2
(2) バ ン ド 乾 燥	4
第 2 節 乾燥上の課題	4
(1) 乾 燥 速 度	4
(2) 胴 わ れ	4
(3) 乾 燥 む ら	5
第 3 節 摘 要	5
第 2 章 穀物の乾燥特性	6
第 1 節 乾燥速度近似計算法	6
(1) 諸条件下における乾燥速度実験式の組合せ	6
(2) 内部拡散による方法	7
(3) 水分・熱収支による方法	8
第 2 節 乾燥におよぼす温度の影響	9
(1) 米粒内の水分拡散係数と温度	9
(2) 初期高温乾燥の実験（実験 1）	11
第 3 節 初期含水比と穀粒の乾湿履歴	12
(1) 初 期 含 水 比	12
(2) 穀粒内の水分勾配	13
(3) 穀物の平衡含水比と乾燥・吸湿の履歴	14

第4節	損傷粒の乾燥	15
(1)	衝撃によるもみの損傷実験(実験2)	15
(2)	乾燥速度実験(実験3)	18
第5節	摘 要	20
第3章	たい積乾燥	21
第1節	水分収支, 熱収支による近似計算法	21
(1)	たい積層内の温度変化	21
(2)	含水比の減少	22
第2節	乾燥空気条件の影響	23
(1)	温度の影響	23
(2)	湿度の影響	23
(3)	空気条件差の実験(実験4)	24
第3節	送風量とたい積厚みの影響	26
(1)	通風速度と圧力損失	26
(2)	風量穀物比と乾燥速度	26
第4節	乾燥前含水比差の実験(実験5)	27
第5節	排気空気湿度の実験(実験6)	29
(1)	計 算 値	29
(2)	実験結果および考察	31
第6節	摘 要	33
第4章	胴われ米の発生	34
第1節	胴われ米発生条件と測定法	34
(1)	発 生 の 条 件	34
(2)	胴 わ れ 測 定 法	34
第2節	収穫前および収穫時の胴われ	35
(1)	収 穫 前	35
(2)	収 穫 時	35
第3節	乾燥過程における胴われ	36
(1)	温 度 の 影 響	36
(2)	乾燥速度の影響	37

(3)	乾燥速度による胴われ実験 (実験 7)	38
(4)	損傷もみの乾燥	38
第4節	吸湿過程における胴われ	40
(1)	急激に吸湿する場合	40
(2)	徐々に吸湿する場合の実験 (実験 8)	41
第5節	摘 要	43
第 5 章	乾燥むらと水分移行	44
第1節	乾燥むら発生の実験 (実験 9、10)	44
(1)	計 算 値	44
(2)	実験結果および考察	45
第2節	貯蔵中における水分移行実験 (実験 11)	47
(1)	実 験 方 法	47
(2)	結 果 お よ び 考 察	47
第3節	乾・湿もみ層接触による水分移行実験 (実験 12)	50
(1)	実 験 方 法	50
(2)	結 果 お よ び 考 察	50
第4節	乾・湿もみ混合接触による水分移行実験 (実験 13)	55
(1)	実 験 方 法	55
(2)	結 果 お よ び 考 察	55
第5節	多段たい積，下層排出法による乾燥むら防止	58
(1)	3 ～ 4 段 たい 積	58
(2)	3 段たい積排出時混合実験 (実験 14)	59
第6節	速風方向変更による乾燥むら防止実験 (実験 15)	61
(1)	反 転 送 風 実 験	61
(2)	吸湿についての検討	61
第7節	摘 要	63
第 2 編	多段たい積乾燥機の設計	65
第 6 章	乾燥機および乾燥施設の具備すべき条件	65
第1節	乾燥機の処理能力	65

(1)	処理能力決定要素	65
(2)	乾燥速度	65
(3)	基準容量に対する過不足	66
(4)	乾燥休止時間	66
第2節	集荷穀物の影響	67
(1)	含水比	67
(2)	集荷量	68
(3)	集荷の日変動	68
第3節	大型乾燥調製施設の関連設備	70
(1)	作業工程	70
(2)	冷却	71
第4節	施設の利用期間と利用拡大	71
第5節	摘要	72
第7章	多段落下型乾燥機	73
第1節	設計上考慮した点	73
第2節	多段落下型の構造	75
第3節	作業成績(実験16)	76
第4節	開閉機構の自動化	78
第5節	張込層および予備乾燥層の増設	81
(1)	張込層	81
(2)	予備乾燥層	81
第6節	摘要	82
第8章	牧草乾燥への利用	83
第1節	牧草の乾燥上の特徴	83
第2節	多段落下型乾燥実験	84
第3節	摘要	87
結 言		88
参考文献		89

緒 言

乾燥は穀物の変質を防止し、貯蔵性を高めるために重要である。¹⁾ 乾燥方法には昔からの天日乾燥のほかに人工乾燥法があり、収穫時の天候不順な地方で採用されていたが、近年天候の良好な地帯でも労力対策、穀物の品質向上を目的として乾燥機の利用が著しくなってきた。穀物乾燥機は米、麦、豆類、トウモロコシなどが研究対象になるが、わが国ではもみ利用がほとんどであるので、もみ乾燥を中心に検討を進めることとした。

穀物乾燥機としては品質をいためずに、大量の穀物が能率的に乾燥でき、かつ乾燥経費が安いことなどが要求されるが、加熱温度や風量をあげて乾燥速度を高めると、胴われや乾燥むらが発生しやすく、過熱や過不足乾燥による品質低下ならびに経費高の問題がある。

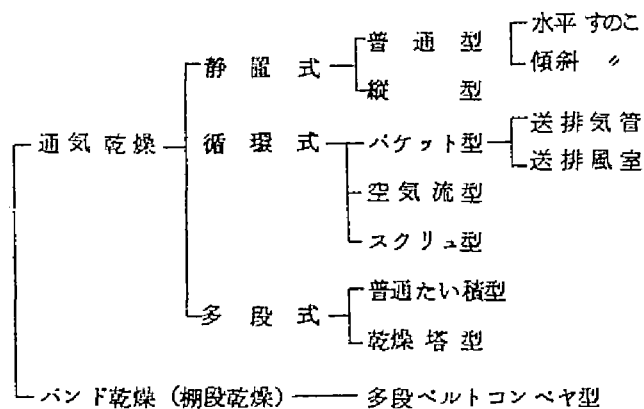
現在市販中の乾燥機は穀物移動の有無により静置式、循環式、また空気流ともみの関係から通気乾燥、バンド（綱段）乾燥などに区分されており、能率と品質保持に重点をおいてそれぞれの工夫がなされているが、穀物の乾燥特性が不明確な点もあり、かなり問題点が残されている。したがって乾燥基準として確立されていない部門を明らかにし、乾燥機の改良や使用技術について配慮する必要がある。

本研究は第1編において各種穀物乾燥機の乾燥上の特徴と問題点を検討し、穀物の乾燥特性、たい積乾燥の課題、ならびに品質問題の胴われ、乾燥むらなどについて明らかにした。さらにこれらの研究結果にもとづき、第2編として性能の高い多段たい積乾燥機の試作と改良を行ない、穀物、牧草などの農産物乾燥を研究対象とした。

第 1 章 穀物乾燥機

乾燥機は構造、加熱方式、使用目的などで分類されるが、現在わが国で使用されているものを構造上、特に送風方式と穀物移動の有無から分けると第 1.1 表²⁾のとおりである。

第 1.1 表 穀物乾燥機の分類



(1) 通気乾燥

空気が穀物層内を圧力こう配をもって通りぬける場合を通気乾燥とよぶ。通気により加熱空気と乾燥材料との接触面積が大きくなるので、一般に乾燥能率が高く、経済的であるとされている。穀物用乾燥機として普及中のものはほとんどこの型式に属し、穀物が乾燥中静止しているか、移動するかにより、静置式、循環式および両者の中間型の多段式に区分される。

静置式 — 普通型は乾燥枠内の“すのこ”上に40cm前後の高さに穀物をたい積し，送

風機で下方より通風する。すのこは水平のものと傾斜したものがあり、搬出の容易さから後者が多くとり入れられている。この型式はたい積に場所を必要とし、穀物の搬出入にやや多くの時間がかかる。たい積場所の減少と搬出を容易ならしめる手段として送風室を縦方向に設け、その両側（または周囲）に厚さ30～40cm層に穀物をつめた縦型のものがある。

この静置式は空気を一方から通風するので、送風側と排風側とでは乾燥の差を生じる。また速い速度でもみを乾かそうとすると送風側の乾きが特に速く、胴われをとまなうので、全層の平均乾燥速度^{*}を1.0%/hr前後にとり、やや低い乾燥速度としている。

循環式 — 穀物の流動性を利用し、乾燥塔内に穀物を充てんした後、ゆっくり流下循環せしめながら乾燥する方法で、静置式で生じる乾燥むらを防止でき、乾燥速度もかなり高められて能率的となるが、循環によるじんあい発生が多く、また選別不良もみは乾燥塔につまるおそれがある。

この方法は規定容量ずつ、制限乾燥速度に近い速さで乾かすので、規定容量に不足する場合はそれだけ乾燥能率が低下する。また構造が複雑となるため機械費が高く、穀物以外の農産物乾燥に利用できない欠点がある。

型式は揚穀機の種類によりバケット、空気、スクリュコンベヤの別があり、あるいは穀物中への送風にあたって送排風室を設けるものと数多くの送排気管を設けるものにわけられる。

多段式 — 静置式は1層のみのたい積であるが、これをろ～6段にわけてたい積し、乾燥した最下段から間けつ的にとり出し、上段のものは逐次下段に移動せしめ、最上段には未乾燥の穀物を新たに搬入し、この操作をくり返す方法である。静置式の乾燥むら防止と乾燥速度向上をねらっており、かつ循環にとまなうじんあい発生防止のため、間けつ的に落下せしめている。たい積各段は単純たい積のものと穀物層中に送排気管を設備するもの（循環式の送排気管型と同様）があり、前者は牧草などの多目的利用が可能であるに対し、後者は穀物用のみとなっている。

この型式のものは数区分された穀物が1台の乾燥機に投入されるので、搬入穀物量に変動があっても、循環式のように能率に著しい影響を与えない。（第6章第1節）しかし搬入穀物の含水比変動が大きい時、高水分のものを投入後、低水分のものが搬入された場合

* 乾燥速度：単位時間に失なわれる水分量を乾量基準含水比で示した。

には支障をきたすこともある。

(2) バンド乾燥（棚段乾燥）

穀物および空気の相互移動による乾燥法で、穀物を金網製ベルトコンベヤ上にたい積し、移動せしめながら熱風を送って乾かす方法である。空気はたい積物中を通過しにくく、乾燥むらを防ぐ意味からうすたい積としている。コンベヤベルトは4～6段に配置し、最上段に穀物を供給し、各段で落下混合されながら乾燥がすすむ。

この方法は連続供給であり、搬入穀物の畚目変動による能率低下がなく、他の各種農産物にも利用できて非常に便利であるが、水分の除去量が比較的少なく、また含水比差のある穀物が搬入された時ベルトコンベヤ速度を変更しにくく、ほぼ一定含水比のものを搬入する必要がある。構造は複雑となり、値段も一般に高い。

以上わが国で使用されるものについてみたが、諸外国で利用されている穀物乾燥機の構造もほぼ同様で^{3) 4) 5)}、回転ドラム式など特殊なものも若干みられるが、通気乾燥が普及の中心となっている。

第2節 乾燥上の課題

(1) 乾燥速度

乾燥能力を高める手段は乾燥速度をできるだけ高くとることであり、特に生脱穀で含水比の高いものはその必要性が高い。しかし乾燥速度を高くともみは胴われし、豆類は割れ豆となるので、ある限度以上の速度で乾かすことができない。麦類はこのような問題がないのでかなり高い温度で乾かすことができるが、発芽力が低下する。

また静置式における熱風乾燥法は送風側と排風側とで乾燥差を生じ、全体の乾燥速度が低下するので、胴われ、過乾燥を生ぜしめることなく、速度を高める方法が望まれている。循環式はこの点一様に乾くが、回分式であるため投入もみ量の影響をうけ、規定量以下の時に能率低下となる。

(2) 胴 わ れ

胴われは稲の立毛中にも発生しており、収穫、冷却、調製時に多発する。発生原因として衝撃、温度の変化、乾燥または吸湿現象があげられるが、主な原因は乾燥・吸湿にともない米粒内外に収縮や膨張作用が生じ、これがひずみとなって胴われするものと判断される。この胴われ発生量はもみの水分領域によって異なり、米粒内に発生する水分勾配の程度と継続する時間によって変化する。胴われの強度のものは検査上被害粒とされ、精米時に碎米やぬかとなるので、胴われを生ぜしめない乾燥方式の確立が望まれている。

(3) 乾燥むら

乾燥むらの生じたものは貯蔵力を減退せしめるばかりでなく、玄米を精白する時むらづきとなり、また碎米発生⁶⁾の原因となる。たい積乾燥でしかも高含水比のものをあつかい、速い速度で乾かすとかかなりの乾燥むらが生じる。乾燥後の乾燥むら防止はあまり期待できないので、できるだけむらの生じないように乾燥する必要がある。循環式で高含水比のものをあつかう時、水滴付着による流下不良があり、また選別不良のものも流動が悪くなり乾燥むらが生じるので、風量を多くとるとか、乾燥前に選別するなどの手段が必要である。

第3節 摘 要

わが国における穀物乾燥はもみを対称とするものが大半をしめ、乾燥方式は通気乾燥によるものとバンド乾燥による方法とが主としてとられている。乾燥能率が高く、経済的なのは前者であり、現在普及中のものはこの型式に属し、静置式、循環式、多段式にわけられる。各型式は処理能力、品質保持、経済性などを考慮して設計されているが、それぞれ得失がある。

乾燥上の問題は処理能力の向上と品質の劣化防止で、乾燥速度を高くしようとすると胴われが多くあらわれ、またたい積乾燥をとるものは乾燥むらが発生する。循環式は乾燥むら防止に役立つが、じんあいの発生、規定量不足による能率低下、多目的利用が難しいなどの欠点がある。従って品質を低下せしめることなく、しかも能率の高い乾燥方式はいかにあるべきかが現状における問題点である。

第2章 穀物の乾燥特性

第1節 乾燥速度近似計算法

乾燥の遅速は一般に単位時間、乾燥材の単位表面積あたり、あるいは単位時間あたり蒸発する水分量^{*}をもってあらわし、これを乾燥速度としている。乾燥速度は経過時間に対する材料の含水比曲線から求められ、恒率乾燥期間と減率乾燥期間にわけられる。

恒率乾燥期間は水面からの水の蒸発と同様に、水の示す蒸気圧 (p_w) と空気中の水蒸気分圧 (p) との差 ($p_w - p$) に比例して乾燥材表面から水分の蒸発が行なわれ、乾燥速度は表面蒸発係数によってきまる。

もみの収穫時の含水比は33%前後であり、水分の多い間は恒率乾燥期間を示すが、主として減率乾燥期間となっている。この乾燥期間は粒体内部の水分が材料表面に液体または気体状で拡散し、材料表面から空气中に蒸散するので、内部拡散係数が乾燥速度を支配する。乾燥速度は送風空気温度、湿度、送風量、乾燥材の初期含水比、たい積層厚みなどに関係し、これら諸条件の複雑な関数として与えられる。そのため乾燥速度を数学的に求めることが難しく、近似的に示す種々の方法が研究されている。⁷⁾

(1) 諸条件下における乾燥速度実験式の組合せ

市村氏ら^{8) 9)} は乾燥速度に影響する要因を空気温度、湿度、空気速度について薄いたい積層で実験し、実験式を導いている。たい積層が厚く、また厚みが増えると適用できないので、乾燥速度に与えるたい積層厚みの影響、すなわち見かけの乾燥速度について近似式を誘導し、かつ乾燥前含水比変化による乾燥特性を加味した式 (2.1) を提示している。

-
- * 水分含量の表示法は湿量基準によるものと乾量基準によるものとがあり、前者を含水率、後者を含水比で表現し区別した。乾燥速度の理論計算などには含水比による方が便利であり含水比で表示したが、穀物水分は一般に湿量基準による含水率が使用されるので、併記して示すようにした。

$$\begin{aligned} dm/d\theta = & 4773 [0.2751 t^{2.1} \times 10^{-3} - (1.54 H_A - 0.075)] \\ & [(1.402 - 0.0384 Md_0)] [(47.1 - 20.2 e^{-7.49u}) e^{-23(n-1)}] Md^n \times 10^{-3} \\ & \dots\dots (2.1) \end{aligned}$$

上式中：

- n : $(3.7 - 0.6 e^{-5u}) e^{-0.04 \cdot \ell \cdot e^{-25u}}$
 $dm/d\theta$: もみの乾燥速度 (g/hr) ,
 t : 空気温度 (°C)
 H_A : 絶対湿度 (kg-water/kg-dry air)
 u : 空気の流速 (m/sec)
 ℓ : たい積層の厚み (cm)
 Md_0 : 初期含水比 (%)
 Md : 乾燥過程の含水比 (%)

この式は乾燥速度の要因別の実験を組合せたものであり、非常に複雑な実験式となっている。Simmonds, Word, McEwen氏ら^{10) 11)} は小麦について一連の研究を行ない、これと同様な傾向を得ている。

(2) 内部拡散による方法

久郷氏ら¹²⁾ は乾燥操作による材料の含水比変化を求めるために、内部拡散係数が温度、送風量、たい積層高などに影響される点に着目し、A. B. Newman氏^{13) 14)} の式 (2.2) に、各温度における乾燥時間と脱水率の結果を使って、試算によって拡散係数を求めている。

$$\frac{Md_0 - Md}{Md_0 - M_E} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{4n^2\pi^2 D \theta}{d^2}} \quad (2.2)$$

- 上式中： Md : 穀物含水比 (%) θ : 時間 (hr)
 Md_0 : 初期含水比 (%) D : 拡散係数 (m²/hr)
 M_E : 平衡含水比 (%) d : 乾燥材の径 (m)

球体における水分拡散速度は同球体における温度拡散の式が適用されと考えられるので、拡散水分の濃度を δ 、時間を θ 、水分拡散係数を D 、球の中心から任意の距離を r とすると次式であらわされる。¹⁵⁾

$$\frac{\partial \delta}{\partial \theta} = D^2 \frac{\partial^2 \delta}{\partial r^2} \quad (2.3)$$

(2.2)式は風量とたい積層厚みに対する問題があるので、久郷氏らはその影響を加味し、一般性のある式(2.4)を示した。

$$D_G^t = 2.09 \times 10^{-11} t^{2.78} - \{ 6.3 \times 10^{-8} \exp(0.0545 t) + 6.47 \times 10^{-9} L \exp(0.0962 t) \} \exp(-6.34 \times 10^{-5} G) \quad (2.4)$$

上式中： D_G^t ：複合拡散係数^{*2} (m^2/hr) L ：層高 (m)
 G ：通気量 ($\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$) t ：温度 ($^{\circ}\text{C}$)

この式はたい積層が厚い場合や通気量が小さい場合に適用されにくいので、層高/通気量から複合拡散係数 D_G^t の平均値 D_{av} に対する補正項 ϕ を求めている。

$$\phi = 1 - (0.147 t - 3.9) \times 10^3 \left(\frac{L}{G} \right) \quad (2.5)$$

すなわち D_G^t にこの ϕ をかけることにより、実際の平均拡散係数 D_{av} を算出している。なお乾燥速度は自由含水比と個体内水分移動係数の関係線図¹⁶⁾によって求める。

この実験条件は湿度が $0.005 \sim 0.008 \text{ Kg/Kg}$ 、温度 $40 \sim 55^{\circ}\text{C}$ で湿度の影響が無視できる範囲の結果であり、かつ 50°C を越えると拡散係数は一定値に達するのにやゝ時間がめいり、適用範囲の限定がある。

また A. Hustrulid and A. M. Flikke 氏はこの拡散方程式による方法を利用してトウモロコシの理論乾燥曲線を求め、実験値と一致していると報告している。¹⁷⁾

(3) 水分・熱収支による方法

平岡氏¹⁸⁾は通風空気と乾燥材の間には水分収支および熱収支があることから、減率乾燥時間における乾燥速度をたい積層の微少厚みについて解析し、連立微分方程式を提案しているが、乾燥速度は空気温度、湿度、風量、乾燥材の含水比、物理的・化学的性質などの複雑な関数であり、今後の研究課題としている。

S. M. Henderson and S. Pabis 氏は薄い層の場合は次式に従うとし、¹⁹⁾

* 拡散係数をあらわすに温度と通気量の影響を加味して表示したので、複合拡散係数と称した。 D_G^t の値は乾燥時間とともに徐々に大きくなり、一定値に近づくが、この一定値を採用すると実際の乾燥速度より速い結果がでるので、一定に達するまでを過渡状態と考えた。

$$\frac{\partial M_d}{a \partial \theta} = -K(M - M_E) \quad (2.6)$$

$$\frac{M_d - M_E}{M_{d_0} - M_E} = a e^{-K\theta} \quad (2.7)$$

上式中： M_d ： θ 時間後の含水比（%） θ ：乾燥時間（hr）

M_{d_0} ：初期含水比 （%） a ：粒の形状による係数

M_E ：平衡含水比 （%） K ：乾燥係数

乾燥係数は粒径，ガス常数，温度，水の蒸散量などによってかわり，実験的に求めている。²⁰⁾

渡辺氏^{21) 22)}，D.S. Boyce氏²³⁾らは穀物を微少厚みにわけ，たい積層の微少厚みについて蒸発水分量と小時間内の送風量から温度降下を計算し，一方水分が通風空气中に蒸発しても湿球温度は一定であることから，乾球温度の異なる乾燥速度特性を実験で求め，空気条件，材料条件が異なった時でも乾燥速度が算出できるようにしている（第3章第1節参照）。この方法は経時的，各層別の乾燥速度計算法であり，前二者の平均乾燥速度計算法と異なる。

以上近似計算法についてみたが，本論文ではたい積乾燥過程で生じる乾燥むら，胴われ，平均乾燥速度向上の三点を中心に検討するので，第3章では乾燥経過状況を経時的に微少厚みにわけて各層ごとに算出する方法をとった。

第2節 乾燥におよぼす温度の影響

(1) 米粒内の水分拡散係数と温度

拡散係数に影響を与える因子としては比重，含水比，穀物の種類と大きさ，温度，湿度，風速などがあげられる。含水比が10～35%の範囲では一定値と考えてさしつかえないように²⁴⁾，風量が非常に大きく，しかも湿度の低い条件下で，もみについて温度 t （℃）との関係を実験した久郷氏らの結果¹³⁾は次式のとおりである。温度が高いと拡散係数は非常に大きくなることを指摘している。

$$D = 2.09 \times 10^{-11} t^{2.78} \quad (2.8)$$

また経過時間に対する拡散係数は乾燥初期に小さく，時間とともに増大し，一定値に近

づく傾向がある。これは加熱にともなう粒体内の温度上昇による増大で、粒外表面から内部へ熱拡散が行なわれ、温度勾配の経時変化によるものである。拡散係数が一定値に近づくに要する時間は風量と温度によって異なる。風量が比較的に高く ($1,500 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 以上)、温度が 40°C 位では40分前後では一定値に達するが、 45°C 以上では温度上昇にともなって拡散係数は漸増し、一定値に達するのに100分以上もかかる。

穀物温度の上昇は比熱と熱伝導度が影響し、Kazarian, Hall 氏は熱伝導度 (k)²⁵⁾ について次の実験値を提示している。

$$\begin{aligned} \text{小麦} \quad k &= 0.0676 + 0.000654 \text{Md} \\ \text{トウモロコシ} \quad k &= 0.0814 + 0.000646 \text{Md} \end{aligned} \quad (2.9)$$

また比熱については G.A. Haswell 氏²⁶⁾ および R.W. Disney 氏²⁷⁾ の研究があり、ブンゼンのカロリメータを使って実験し、含水比との関係式を第2.1表および第2.1図のように示している。

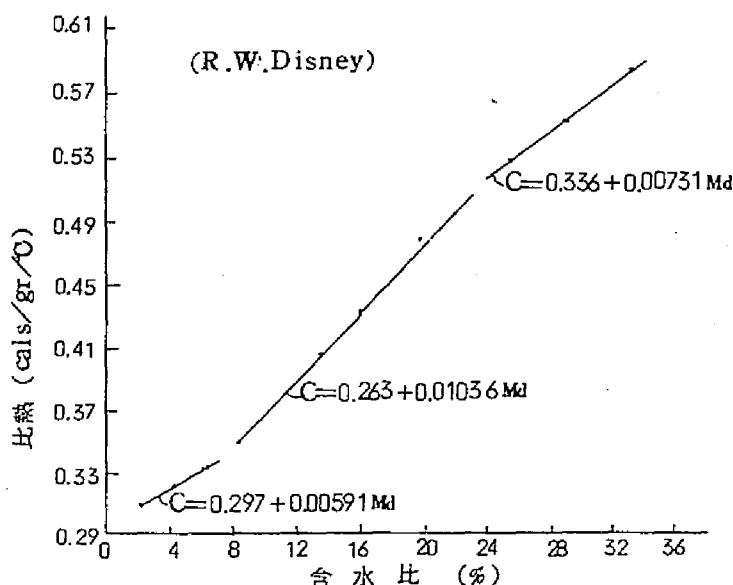
第2.1表 穀物の比熱 (2.10式)

(G.A. Haswell による)

穀物名	式	見かけの水の比熱
もみ	$C = 0.265 + 0.0107 \text{Md}$	1.335
玄米	$C = 0.287 + 0.0091 \text{Md}$	1.197
精白米	$C = 0.282 + 0.0090 \text{Md}$	1.182
オート麦	$C = 0.305 + 0.0078 \text{Md}$	1.085
カラス麦	$C = 0.257 + 0.0119 \text{Md}$	1.447

熱伝導率と比熱から求める熱拡散率は穀物の場合、比較的小さい。一方穀温が高いと水分拡散係数は著しく増大するので、乾燥速度を当初から高めたい場合は乾燥初期に高い温度の風を送り、なるべく早く目標とする穀温に到達せしめる必要がある。

通気乾燥法の効率が高いと²⁸⁾ いわれるのは加熱空気が穀物層内を通過する際、湿度の低い空気が供給されるばかりか、1粒1粒の穀物がそれぞれ加熱されるからである。バンド乾燥では空気流と平行して穀物が移動し、通気が悪いため穀温上昇に時間がかかり、効率は低下する。



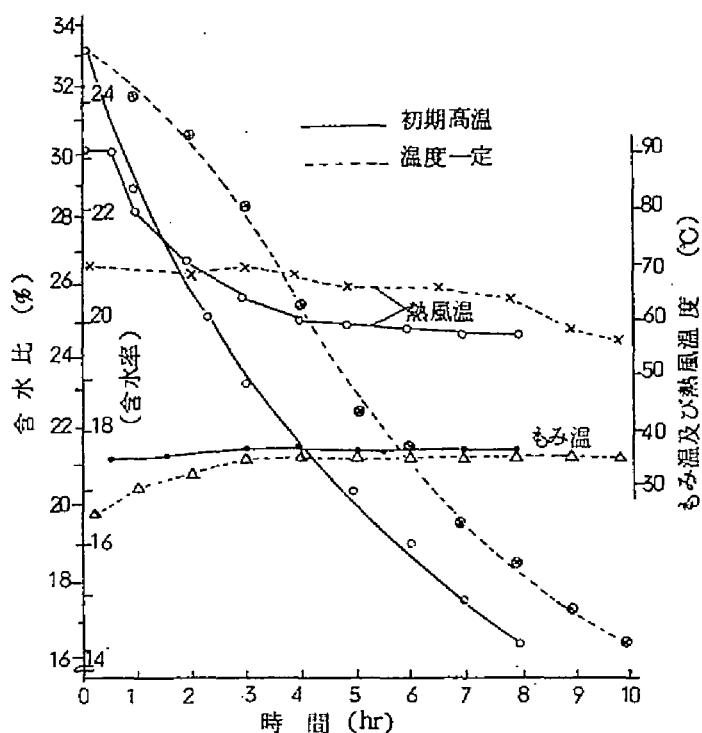
第2.1図 小麦の比熱

(2) 初期高温乾燥実験 (実験1)

実験方法——もみ容量 1.0 トンのライスセンター用循環式乾燥機 (金岡製) を使用し、品種、金南風、含水比 31.6% (含水率 24%) の生脱穀もみを供試して実験を行なった。試験区は初期高温乾燥区と一定温区にわけ、前者は最初 90°C の熱風を 30 分間送風した後 3 時間かけて漸次温度を下げ 60°C 程度に保持し、後者は乾燥期間中 60~70°C に保った。風量は 1 区約 0.9 トンの生もみに 0.25 m³/sec を送り、経時的に含水率変化を測定しながら仕上げ時の含水比 16.3% (含水率 14%) を目標に乾燥した。水分測定は 105°C の直接法*によった。

実験結果——第 2.2 図に乾燥経過図を示したが、一定温区は当初もみ温を上昇せしめるのに時間を要し、初期の乾燥速度は緩慢であった。高温区はもみ温を早く高めたために最初より速い速度で乾燥し、乾燥能率をかなり高めることができた。これは前述の拡散係数

* 穀物の水分測定は 105°C、5 時間の直接乾燥法が普通使用されているので、実験 1, 7 はこの方法によって含水比をきめたが、水分値の変動が生じやすく、かつ定量値とのひらきが 0.6~0.7% ある。⁹⁹⁾したがって実験 1, 7 以外は農林省食糧研究所の推奨する方法、すなわち採取したサンプルを手動ローラで粉砕し、130°C の電気式定温器に 3 時間入れて乾燥し水分量を算出した。



第 2.2 図 加熱温度の相違による乾燥速度

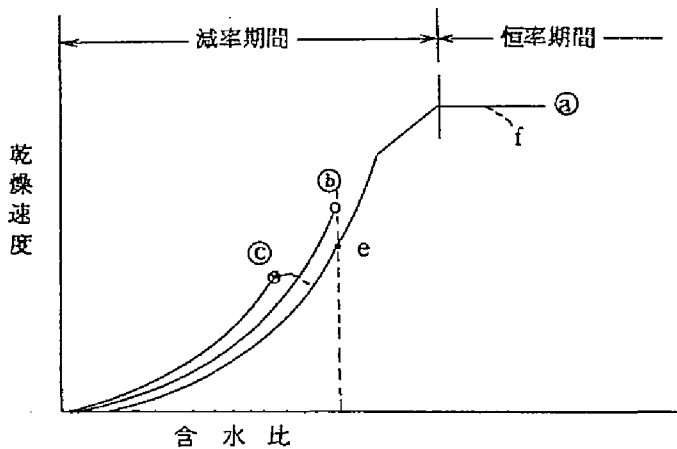
を早く高めた理由によるもので、含水比 23.5% (含水率 19%) の半乾燥もみについても同様な結果を得た。

第 3 節 初期含水比と穀粒の乾湿履歴

(1) 初期含水比

穀物の含水率は刈取時期や気象条件の影響を受け、乾燥前の含水比は多様である。ライスセンターに搬入されるもみ含水比は生もみ、半乾燥もみがあるので、18~35%の多岐にわたっている。初期含水比が乾燥特性に及ぼす影響についてみると第 2.3 図のとおりである。すなわち初期含水比以外の条件が同一の場合、恒率乾燥期間内にある間は含水比に関係なく一定であるが、減率乾燥期間内にあると乾燥速度は異なる。

減率乾燥期間では穀物の示す蒸気圧は含水比の高いものほど大きくあらわれる。²⁹⁾したが



第 2.3 図 初期含水比と乾燥速度の関係

って含水比の大きいものほど初期乾燥速度は大きいですが、定常乾燥状態にあるものについて考えると次の問題がある。例えば第 2.3 図①は高含水比のため当初恒率乾燥を示し、減率第 1 段、第 2 段の過程をとる。乾燥開始後かなりの時間が経過した点 e は②材料の含水比と等しいが、乾燥速度に相違がある。すなわち②は乾燥初期で粒体内外の含水比の差が小さく、①はかなり乾燥時間を経たもので、材料表面の含水比が低い状態にあり、表面含水率の低い材料は内部拡散が低下し、乾燥速度差を生ぜしめる。

また第 2.3 図の点線 f に示すように乾燥初期定常乾燥に達するまでに若干時間を必要とするが、熱風が穀物を温めるに消費されるからで、S.M.Henderson 氏は穀粒温度が上昇している間、水蒸気移動がおこらないと仮定し、空気温度 (t_a)、穀物温度 (t_g)、穀物乾物重 (w)、比熱 (S)、密度 (ρ)、面積 (A) との関係を次式のごとく示している。

$$\frac{dt}{d\theta} = \frac{-kA}{S \cdot \rho \cdot w} (t_a - t_g) \quad (2.11)$$

ただし、 k [$\text{Cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$] は係数である。

(2) 穀粒内の水分勾配

減率乾燥期間にある穀粒は粒内部の水分が材料表面に拡散し、その表面から空气中に蒸散するので、粒の内外には水分濃度の勾配が生じる。佐藤氏は³¹⁾電気抵抗水分計を用いて

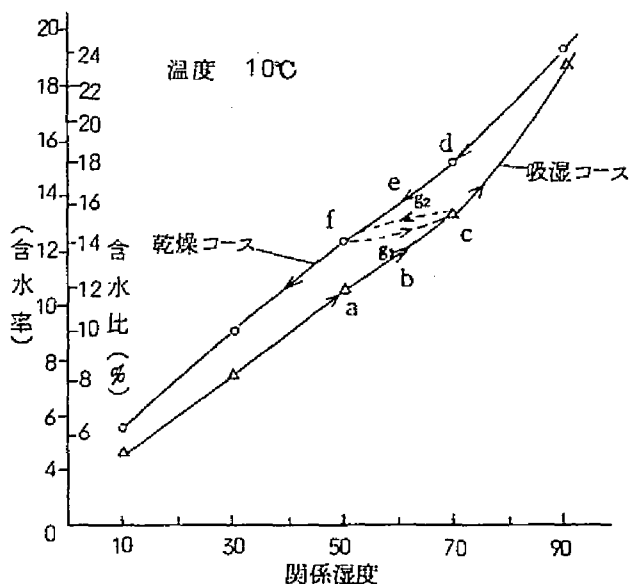
米粒の表層，中間，中心部の水分分布を測定し実験的に証明している。

また第 2.3 図に示すように初期含水比差のあるものを乾かした時，同一含水比の時点では高含水比の乾燥速度が低くなるが，乾燥を一時中止すると穀粒内部の水分勾配は均衡化され，それ以後の乾燥速度を速める。すなわち第 2.3 図の e 点で休止し，数時間後再乾燥すると⑤と同様な乾燥状況を示す。

もみはもみがらと玄米の異質のものから構成されるが，乾燥は主として玄米の水分がもみがらに拡散し，もみがらから蒸散するとされている。³²⁾ 乾燥過程におけるもみがらの乾燥速度はかなり速く，玄米との水分差は大きくなるので，途中で乾燥を休止するテンパリング方式を採用すると効果的に乾かすことができる。

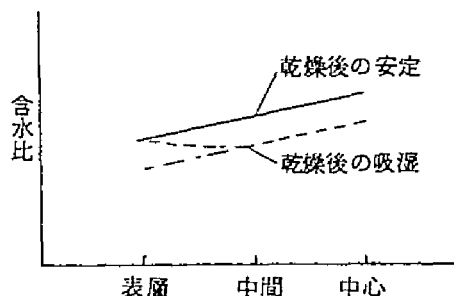
(3) 穀物の平衡含水比と乾燥・吸湿の履歴

穀物は一定の温度，湿度の空気において一定の水分を含み平衡に達する性質がある。³³⁾ この平衡水分値は材料の種類によってそれぞれ異なり，^{34) 35) 36) 37)} またもみの事例についてみると第 2.4 図のように乾燥と吸湿過程では差異が生じる。³⁸⁾ すなわち水分の多いもみが乾く時は d, e, f のコースをたどるが，乾燥もみが吸湿する時は a, b, c のコースで湿る。ここで f—含水比のもみが湿る場合は f, g₁, c のコース上で平衡値をしめし，また



第 2.4 図 もみの平衡含水比 (乾燥・吸湿コース)

吸湿してc-含水比を示すもみが乾燥する時はc, g, fのコースをとる。これは粒体内が乾燥過程にあったものか、吸湿過程にあったものかにより、若干の水分勾配を保ったまま平衡含水比に達していると判断される³¹⁾したがって同じ湿度に対し乾燥過程と吸湿過程とでは、穀物表面は第2.5図の如き状態で平衡して



第2.5図 粒内の含水比

いると推定され、吸湿コースにあるものの方が低い含水比を示す。

か干し中の稲は雨や露によって乾燥や吸湿がくりかえされ、また立毛中といえども出穂後、一定日数を経過したものは外界の影響をうけて含水比が変動するので、ある含水比を示すもみを乾かす時、乾燥、吸湿過程のいずれにあったかにより若干異なる。²²⁾

A. Hustulid氏はトウモロコシについて実験し、吸湿のものは初期段階にかなり速い速度で乾いたと報告している。³⁹⁾

この平衡含水比は温度によって異なり、高い温度になれば拡散係数が増大するので、乾・吸湿コースは近接した値を示す。

第4節 損傷粒の乾燥

(1) 衝撃によるもみの損傷実験 (実験2)

コンバインによる水稻の収穫もみは脱穀中にシリンダの衝撃、その他の力をうけて脱ぶ米や碎米が発生する。また完全なもみと思われるものども、つぶさに観察するともみがらの開えいたものやき裂のはいった異常もみ⁴⁰⁾がみられる。この脱ぶ米や異常もみの発生は機械の調整や刈取り稲の条件によって異なり⁴¹⁾10~30%も観察され、品質低下の原因ともなっている。損傷はもみに限らず大麦、小麦、牧草種子などほとんどの種子類にみられ、破砕や発芽率の低下となつてあらわれている。^{42) 43) 44)}

この脱ぶ米、碎米、開えいもみ、き裂もみなど(損傷粒と総称する)を乾かす時、水分はもみからも蒸散するが、玄米から直接蒸散するものも多いと考えられ、乾燥速度の

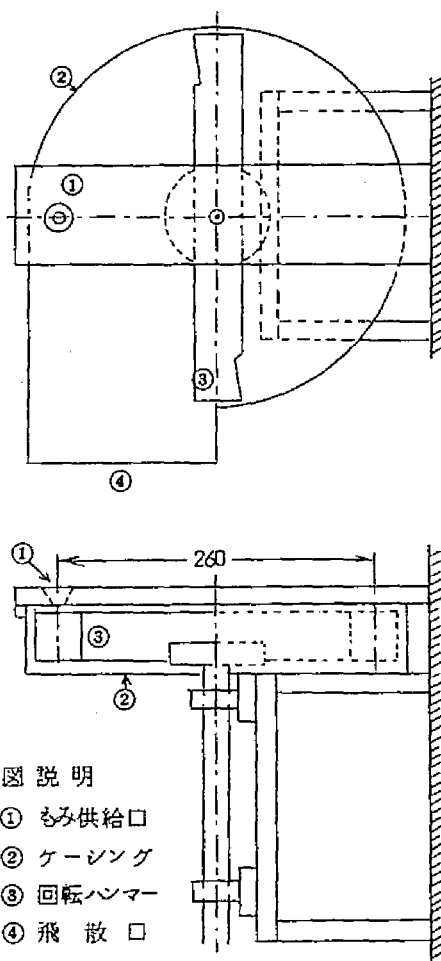
上昇が予想される。したがって第2.6図に示す穀物衝撃試験機を試作し、⁴⁵⁾ 各もみに一様な衝撃を与えて損傷を生ぜしめ、乾燥用の供試材料とした。

もみ収穫日別と衝撃速度別の実験区分(第2.2表)にもとづいて実験を行なった結果、損傷粒の発生は第2.3表に示すとおりである。もみ収穫日と衝撃の要因があるため二元配置法による分散分析を行なって検討を加えた。⁴⁶⁾

衝撃速度の影響は第2.7図に示すとおりで、1,250 m/min より損傷率は急増している。またコンバイン収穫もみもほぼ同様な傾向を示しており、損傷粒の増加割合は両対数グラフ上で直線を示すので、損傷率 (y_s) は次の実験式によって増加するものと思われる。⁴⁷⁾

$$y_s = C_1 x_s^\alpha \quad (2.12)$$

但し、 $750 < x_s < 2,000 \text{ m/min}$



第2.6図 穀粒衝撃試験機

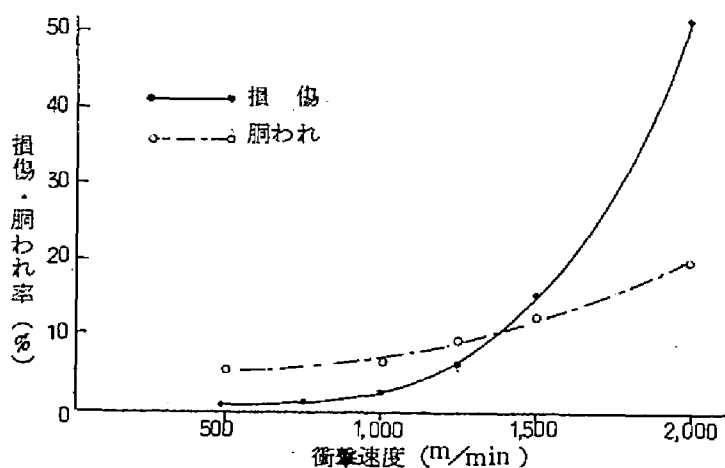
第2.2表 実験区分

区 分	もみ採取月日	採取時水分		衝撃速度	備 考
		含水比	含水率		
№ 1	10月21日	30.60%	23.43%	0%in	品種 中生新千本 40℃乾燥は № 3~7 の試 料について実 施した。
2	26	27.53	21.59	500	
3	11 1	33.40	25.04	750	
4	5	25.99	20.63	1,000	
5	10	32.47	24.51	1,250	
6	15	27.60	21.63	1,500	
7	29	23.76	19.20	2,000	

(注) もみ採取日にはもみの熟度と水分の要因が含まれる。

第2.3表 もみ採取日別・衝撃速度別の損傷粒

衝撃速度 $\frac{m}{min}$ 調査区分 (回転数)		500 (612)	750 (918)	1,000 (1,220)	1,250 (1,530)	1,500 (1,840)	2,000 (2,450)
161	異常もみ	0	0	1.29	9.49	21.17	34.18
	脱ぶ米	0	0	0	0	0.73	158.2
	計 (損傷粒)	0	0	1.29	9.49	21.90	500.0
2	異常もみ	0.83	1.42	1.46	4.73	10.96	28.03
	脱ぶ米	0	0	0	0	0	24.20
	計	0.83	1.42	1.46	4.73	10.96	52.23
3	異常もみ	0.94	0.91	0.86	7.02	18.32	35.32
	脱ぶ米	0	0	0	0	0.76	6.72
	計	0.94	0.91	0.86	7.02	19.08	42.04
4	異常もみ	0	0	2.68	4.17	9.45	24.62
	脱ぶ米	0	0	0	0	2.36	18.46
	計	0	0	2.68	4.17	11.81	43.08
5	異常もみ	1.82	0.89	1.57	5.47	12.31	31.28
	脱ぶ米	0	0	0	0	1.45	18.44
	計	1.82	0.89	1.57	5.47	13.76	49.72
6	異常もみ	0.92	0.78	1.65	2.83	15.25	23.40
	脱ぶ米	0	0	0	0	4.35	19.80
	計	0.92	0.78	1.65	2.83	19.60	43.20
7	異常もみ	0	0.89	5.51	8.70	16.43	31.80
	脱ぶ米	0	0	0	2.90	8.57	28.60
	計	0	0.89	5.51	11.60	25.00	60.40



第2.7図 衝撃による損傷・胴われ率

x_s : 衝撃速度 m/min

c, α : 供試もみの条件 (品種・含水率など) によって定まる定数

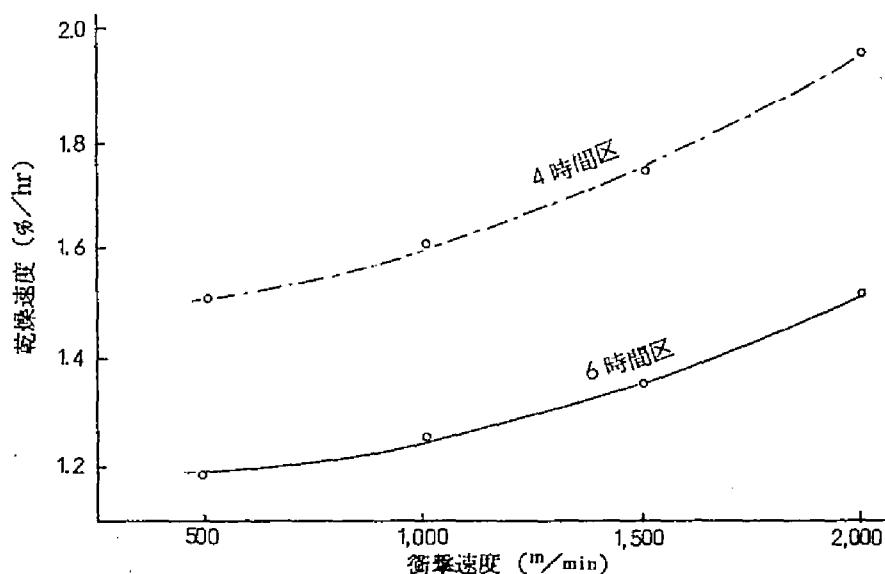
(2) 乾燥速度実験 (実験 3)

第 2.2 表に示す衝撃実験で得た 1 区 5~6 号のもみを 35℃ の定温通風乾燥機 (湿度 0.006 K_g/K_g 前後, 風量 0.06 m^3/min) に入れて 4~6 時間乾燥した。この時の水分減量をそれぞれの乾燥時間で除し, 乾燥速度としてみると第 2.4 表のとおりである。

第 2.4 表 衝撃もみの乾燥速度

衝撃区分 乾燥 もみ採取区分		500 m/min		1,000		1,500		2,000	
		4 時間区	6 時間区	4 時間区	6 時間区	4 時間区	6 時間区	4 時間区	6 時間区
No.	1	1.48	1.26	1.55	1.33	1.62	1.37	1.92	1.59
	2	1.38	1.10	1.37	1.11	1.45	1.15	1.63	1.27
	3	1.84	1.54	1.91	1.56	2.01	1.65	2.05	1.67
	4	1.23	0.98	1.34	1.10	1.45	1.20	1.65	1.37
	5	1.89	1.55	2.01	1.59	2.01	1.63	2.13	1.70
	6	1.44	1.17	1.45	1.20	1.49	1.23	1.51	1.25
	7	1.24	0.97	1.36	1.05	1.43	1.09	1.45	1.11

(注) 単位 $\%$ /hr



第 2.8 図 衝撃速度と乾燥速度の関係

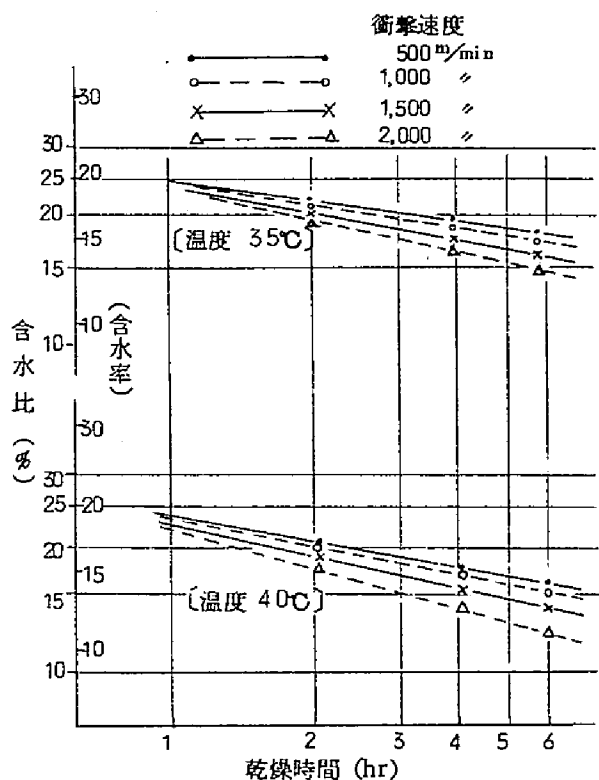
分散分析の結果，衝撃の影響は第2.8図の如くであり，500 m/minまでは差がみられなかったが，衝撃速度が増加するにつれて乾燥速度も早くなっている。4時間区と6時間区では差があるが，時間経過とともに乾燥速度が漸減するためであり，含水比 (Md) と時間経過 (x_n) は第2.9図のようになるので，次式で示される。(17)

$$Md = C_2 X_n^\beta \quad (2.13)$$

但し， $2 < X_n < 6$ 時間

C_2 (%/hr)， β ：もみの含水比，衝撃速度，乾燥空気によって定まる定数である。

含水比26%，衝撃速度500，1,000，1,500，2,000 m/min，乾燥温度35，40℃の



第2.9図 衝撃もみの含水比変化

第2.5表 衝撃もみ乾燥の常数值

$$Md = C_2 X_n^\beta$$

乾燥速度	常数の値 衝撃区分	C_2	β	備 考
35℃	500 m/min	27.8	0.242	
	1,000	〃	0.268	
	1,500	〃	0.300	
	2,000	〃	0.331	
40	500	29.5	0.324	胴われ発生多く，この条件で乾かすことは困難
	2,000	〃	0.405	
35	手こぎ	31.0	0.285	周速度 1,120 m/min 前後
	コンバイン	〃	0.350	

C_2 : %/hr

ものおよびコンバイン収穫もみ（品種マンリョウ，含水比30.6%）についてみると第2.5表のとおりである。

第5節 摘 要

穀物の含水比は一般に35%以下で，これらを乾燥する場合 水分の多い間は恒率乾燥期を示すが，ある程度乾くと減率乾燥期間を示す。減率乾燥での速度は送風空気の温度，湿度，送風量，初期含水比，たい積層厚みなどの複雑な関数として得られる。このように多くの要素がはたらくので，数学的に求めにくく，多くの人々によって種々の近似計算法が提示されている。その主なものは，

- ① 薄いたい積層で乾燥速度に影響する要素について実験し，これを厚いたい積層にも適用できるように見かけの乾燥速度を求めた実験式。
- ② 減率乾燥期間は内部拡散によるものとし，Newman の式を使って拡散係数を求め，風量やたい積厚みが変わった場合に適応できるようにした実験式。
- ③ 乾燥は通風空気と乾燥材の水分収支，熱収支であることから，たい積層を微小厚みに分けて計算する方法などがある。

次に加熱温度，初期含水比，損傷粒などが乾燥速度に及ぼす影響についてみると，

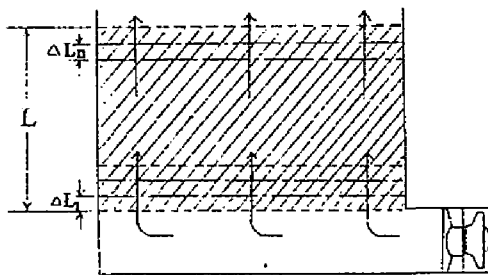
- (1) 穀物のような粒体は内部の水分拡散速度が問題で温度の影響を著しく受ける。穀物の熱拡散率は比較的小さいので，加熱乾燥時，初期に乾燥が一時停滞となるのはこのためである。
- (2) 乾燥速度は乾燥前含水比によって異なり，水分が多いと乾く速度も速いが，同一含水比を示す時点では当初の含水比の低い方が速い乾燥速度を示す。また材料が乾燥過程にあったものか，吸湿過程にあったものかにより乾かす速度に差を生じるが，これらはいずれも粒体内の水分分布差にもとづくものである。
- (3) 穀物は一定の温度，湿度の空気において一定水分を含み平衡に達するが，この値は乾燥・吸湿のいずれの過程にあったものかによって異なる。
- (4) 乾燥速度は同じ材料でも損傷を受けたものかどうかによって異なる。コンバイン収穫のものはかなり損傷粒の発生がみとめられ，乾く速度も速い。衝撃試験機での実験結果では衝撃速度が高いほど損傷率，乾燥速度ともに増加する。

第3章 たい積乾燥

第1節 水分収支・熱収支による近似計算法

(1) たい積層内の温度変化

含水比の均一な穀物をある厚さにたい積させ、下方から乾球温度 T_d 、湿球温度 T_w の空気を送ったとき、最初の空気がふれる底部は T_d 、 T_w の空気条件で乾くが、空気が穀物層を通過するにつれて水分を吸収するので空気湿度は漸次増大し（ T_w は一定で、 T_d が降下すると仮定する）、乾燥速度は底部から上層に移るにつれて順次低下してゆく。



第3.1図 たい積乾燥

厚さ L の層を第3.1図のように ΔL のごく薄い層にわけ、それぞれの層は乾燥むらが生ぜず、均一な乾燥が行なわれるものと見なすならば、下層から上層に移行する空気の温度降下は下層の蒸発水分量と単位時間の送風量から計算される。すなわち ΔL_1 から次の ΔL_2 層に入る空気条件はきまり、湿球温度は変化しないから、 ΔL_n の各層は決定できる。

空気はたい積層内を通過する間にもみから蒸発する水分を吸収して温度が下降する。 ΔL に分割した一つの層に入る空気の乾球温度を T_s °とし、出る時の温度を T_b °とすると

$$T_b = T_s - \Delta T \quad (3.1)$$

ΔT ：層内の水分蒸発による温度降下

もみの水分蒸発と空気の温度降下に関する熱収支は次式のとおりである。

$\Delta \theta$ 時間内の水分蒸発に必要な熱量は、

$$= \frac{v \times w}{100} \times \frac{dM}{d\theta} \times \Delta \theta \quad (3.2)$$

$\Delta \theta$ 時間における送入空気の温度降下量は

$$3,600 \times S \times Q \times \rho_a \times \Delta T \times \Delta \theta \quad (3.3)$$

上式中：

v : 穀物の単位重さ当たり水分蒸発潜熱 (Kcal/Kg)

w : ΔL 層内にある穀物の乾物重 (Kg) ρ_a : 空気の密度 (Kg/m³)

$dM/d\theta$: 層内の乾燥速度 (%/hr) Q : 送風量 (m³/sec)

S : 空気の比熱 (Kcal/Kg °C)

(3.2) = (3.3) であり ΔT を求めると、

$$\Delta T = \frac{-v \times w}{360,000 \times S \times Q \times \rho} \times \left(\frac{dM}{d\theta} \right) \quad (3.4)$$

(3.1) 式は次のようになるので、 $dM/d\theta$ がわかれば層通過後の温度は計算し得る。

$$T_b = T_a + \frac{v \times w}{360,000 \times S \times Q \times \rho} \times \left(\frac{dM}{d\theta} \right) \quad (3.5)$$

(2) 含水比の減少

はじめの時間区の含水比を M_a , 次の時間区の含水比を M_b とすれば、

$$M_b = M_a + \left(\frac{dM}{d\theta} \right) \times \Delta \theta \quad (3.6)$$

$dM/d\theta$ はごく薄い層での実験結果より

$$\frac{dM}{d\theta} = -K (M_d - M_E) \quad (3.7)$$

M_d : θ 時間後の含水比, M_E : 平衡含水比, K : T_d と T_w によって定まる常数

M_E は近似的に $(T_d - T_w)$ の関数となり、また K は $(T_d - T_w)$ および T_w の関数で、実験から求められるので、 ΔL の薄い層に分割した各層の経時的含水比変化が計算できる。^{22) 48)}

K の値は T_w , $T_d - T_w$ の関数で実験から求めるが、数多くの実験を行なわなければならないので、D.S.Boyce 氏²³⁾ はいろんな温度 θ (°C) に適応できるよう次式で示している。

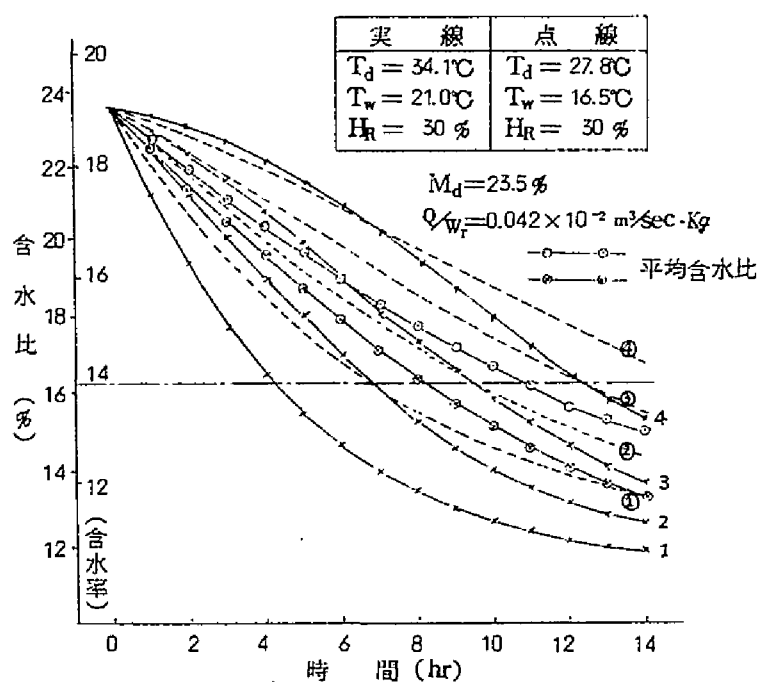
$$K = 8358 e^{-\frac{7967}{\theta + 450}} \quad (3.8)$$

また穀物が温められるために失われる熱量、蒸発温度による潜熱の変化などを計算に入れている。実験結果との対比では厚いたい積層においてかなりの差がでたと報告している。

第2節 乾燥空気条件の影響

(1) 温度の影響

前節の近似計算法にもとづき，温度を変化せしめた場合についてもみの計算事例でみると第3.2図のとおりである。計算はたい積層を12層にわけて行ない，下層より3層ずつ

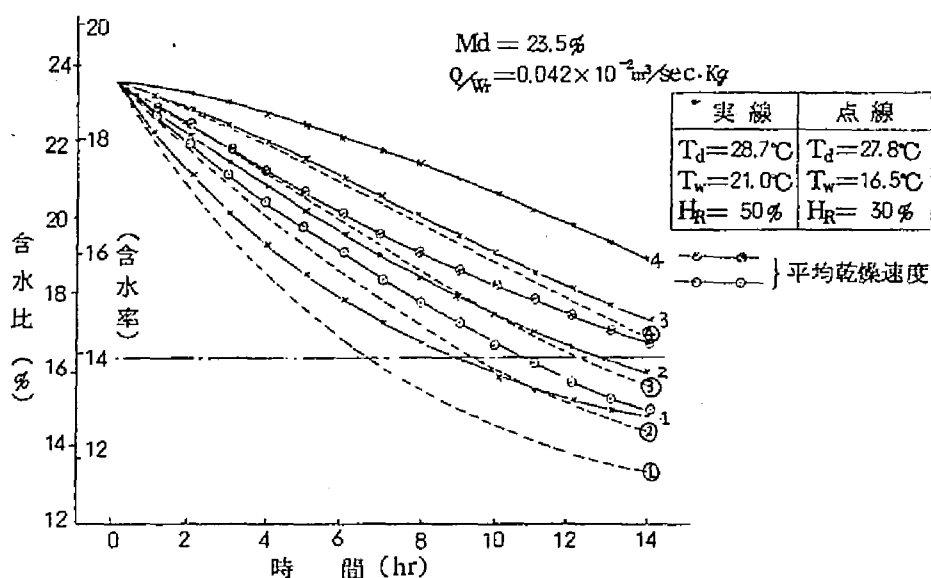


第3.2図 送風温度の差による乾燥速度

を区分して1, 2, 3, 4段とし，各段の平均含水比を図示した。（以後の乾燥速度計算はすべてこの方法で行なった。）このような乾燥差が生じたのは水分拡散係数が温度の関数となり，かつ温度上昇により飽和蒸気圧も高くなるためである。

(2) 湿度の影響

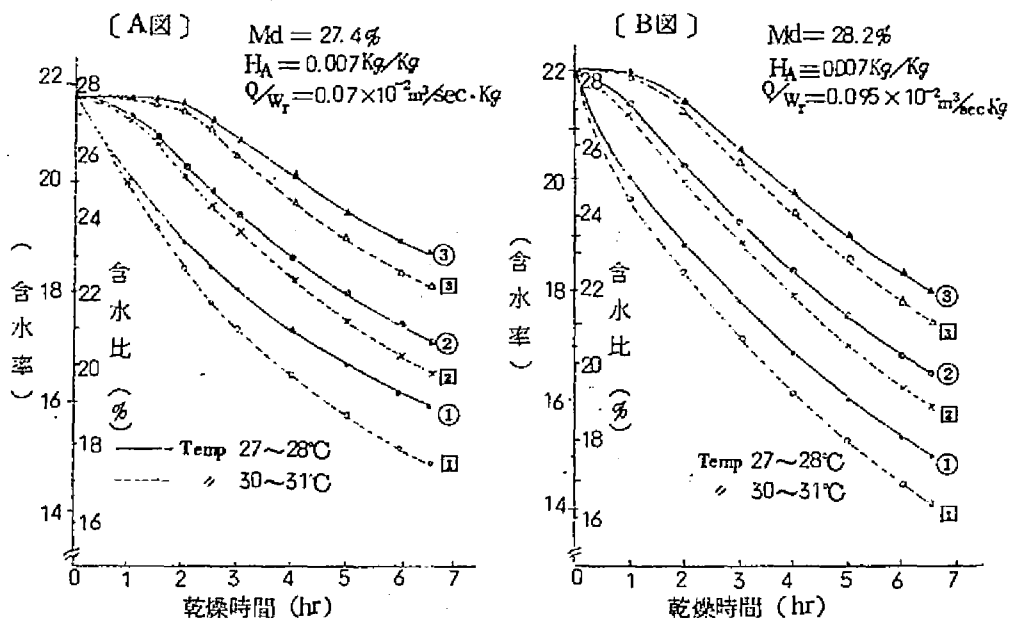
湿球温度28℃前後，湿度50%と30%の空気について計算を行なった結果は第3.3図のとおりである。もみの示す蒸気圧と空気の蒸気圧に差があり，この差の大きいものほど



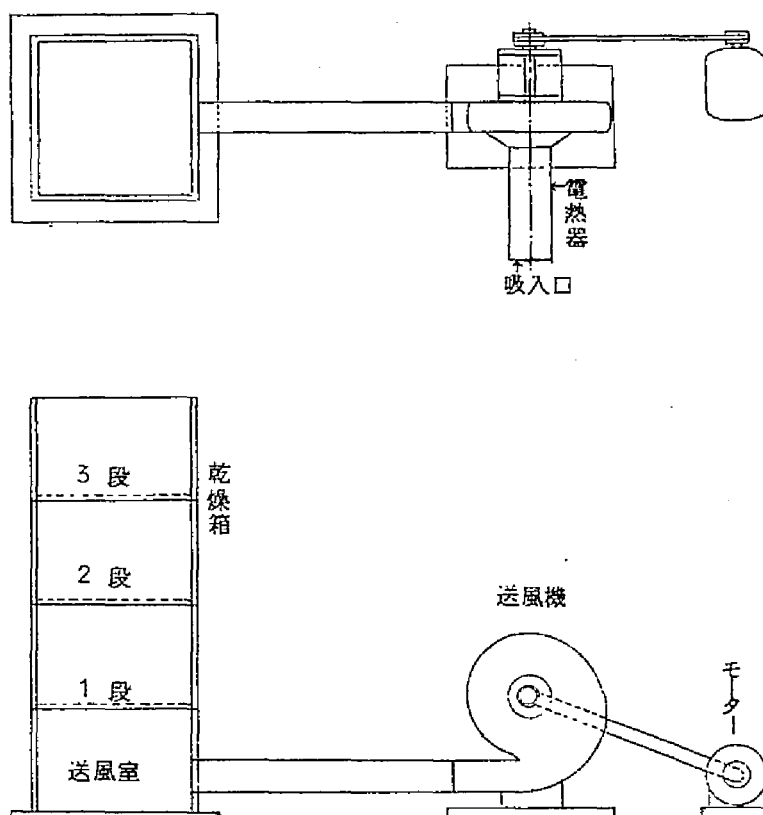
第3.3図 送風湿度差による乾燥速度

乾燥速度は高くなる理由にもとづくものである。

(3) 空気条件差の実験 (実験 4)



第3.4図 空気条件差による乾燥速度 (実験)



第3.5図 多段たい積乾燥実験装置

実験装置 — 第3.5図に示す多段たい積実験装置を使用した。装置は送風量、加熱温度、たい積段数およびたい積厚さを変化せしめて各段ごとの乾燥速度、温度、湿度などが測定できる構造とした。1箱の大きさは内り $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 、高さ 18.5 cm で下面には金網が張ってある。

実験結果 — 含水比 27.4 、 28.2% （含水率 21.5 、 22.0% ）のもみを3段にたい積して、風量穀物比* 0.07 、 $0.095 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$ の空気を送り、温度差 3°C をつけて実験を行なった結果は第3.4図のとおりである。

* 風量穀物比：風量 $Q \text{ m}^3/\text{sec}$ と穀物重 $W_r \text{ Kg}$ との比 Q/W_r を風量穀物比とよぶ。含水比によって W_r は異なるが、穀類の含水比変動の巾は比較的小さく、概略値としてあつかう場合にはさしつかえない。また穀物 100 Kg 当たりの風量表示が多く使用されるので、 $10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$ の単位で示すことにした。

空気を加熱すると空気温度は上昇する一方湿度はキャリヤー図表によって低下するので、実際の加熱乾燥では温度と湿度の影響を同時にうける。本実験によると乾燥開始 6.5 時間で、下層 1.4 %、中層 0.8 ~ 0.9 %、上層 0.6 % 程度の乾燥速度差を生じた。

第 3 節 送風量とたい積厚みの影響

(1) 通風速度と圧力損失

たい積乾燥では空気が穀物層を通過するにつれて乾球温度が低下し、湿度は高くなるが、通風量の増減に比例して変化する。各層における温度変化は乾燥速度に差を生ぜしめ、全体の平均乾燥速度を低下せしめる。通風量を十分多くとれば、たい積厚みに関係なくほぼ等しく乾くはずであるが、厚い層では風速増加による圧力損失が著しく、消費動力は極端となるので経済速度とする必要がある。圧力損失に関する因子は空疎率、粒子の径、形状、つめ方、材料表面のあらさなどがあげられており、渡辺氏は³⁸⁾ 圧力損失 h を次式^{49)~52)} で示している。³⁸⁾

$$h = \alpha L^{\beta} u^{\gamma} \quad (3.9)$$

L : たい積厚み (cm) u : 風速 (cm/sec) α : 係数 (sec/cm)

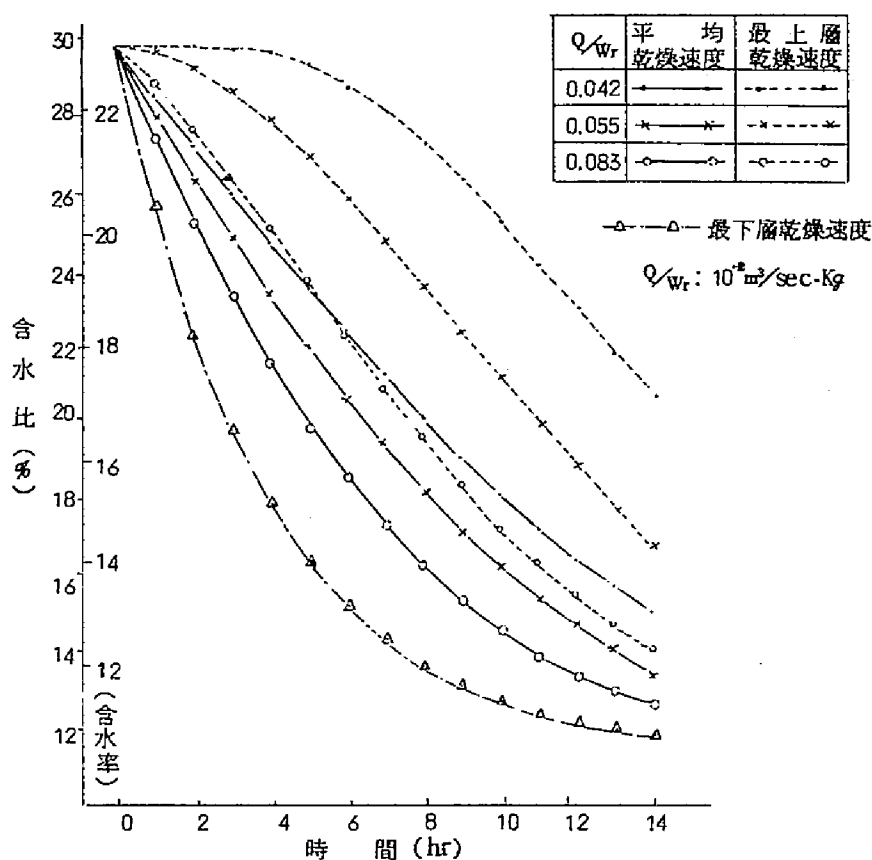
α, β, γ : 穀物の種類, 含水比, 密度などによる常数

穀粒についての実験値はたい積高さ 1 m 以内、風速 0.1 m/sec 付近で $\beta \doteq 1$, $\gamma \doteq 1.3$ を示し、風速 2 倍になると圧力損失は 2.8 倍となる。

(2) 風量穀物比と乾燥速度

風量穀物比を 0.042, 0.055, $0.083 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$ に変化せしめた時、式(3.5) (3.7) によって計算した平均乾燥速度は第 3.6 図のごとくで、また風量を 0.07, $0.095 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$ にとった時の実験結果は第 3.4 図 A, B のとおりである。最下層の乾燥速度が同一であるにもかかわらず、平均速度が異なる理由は風量により上層部の乾燥速度差を生じるためである。風量穀物比が平均乾燥速度に影響する範囲は $0.25 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$ までとされており²²⁾ それ以上は風量を増加しても効果があまりあらわれない。

また風量穀物比を高くすると消費動力の増加が著しく、かつ送風機の選定問題が生じるので、半乾燥もみを 40 cm 前後にたい積して乾かす場合 $0.06 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$ を標準と

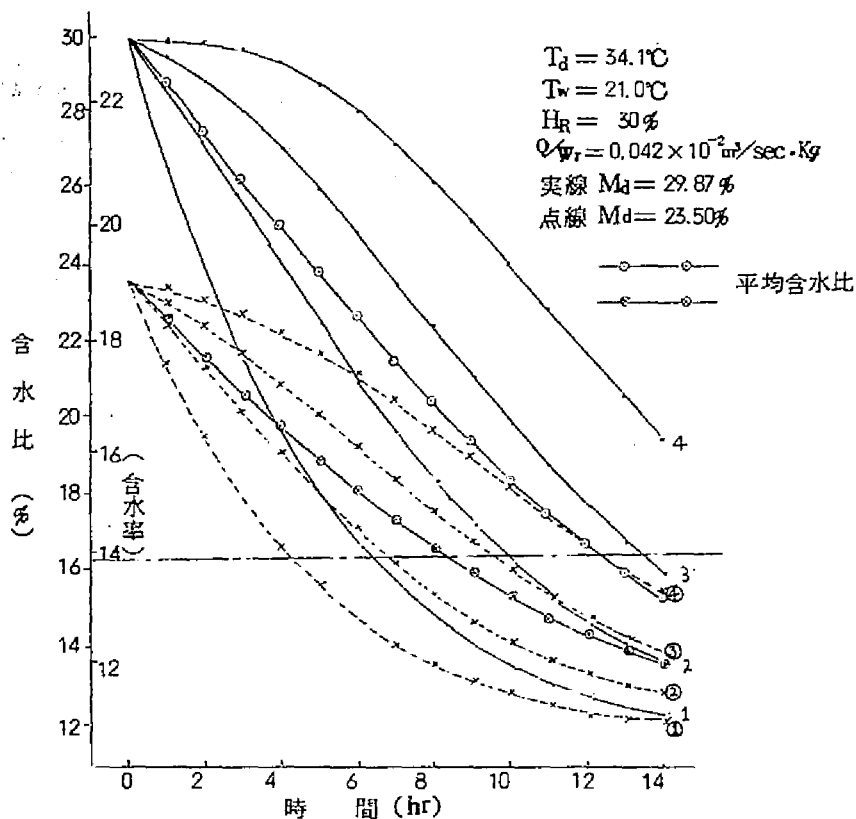


第3.6図 風量穀物比差による乾燥速度

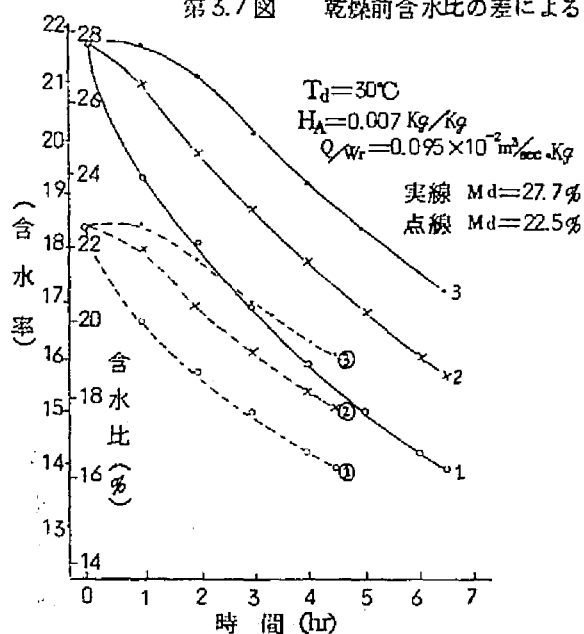
しており，生もみ乾燥ではこれより高い値をとる。

第4節 乾燥前含水比差の実験（実験 5）

含水比29.9%と23.5%のもみについて計算結果をみると第3.7図のとおりである。高水分のものと低水分のものとは，上層および下層の乾燥速度に差があり，含水比が高くなるほど上下層間の含水比差が大きくなる。乾燥初期高水分の下層もみは低水分のものより早く乾き，かつ除去水分量が多いため温度低下と湿度の増加が著しく，上層の乾きが悪い。しかし時間の経過に従い下層の乾燥速度が低下するにつれて上層部の速度は漸次増加



第3.7図 乾燥前含水比の差による乾燥速度



第3.8図 3段たい積乾燥実験

する。

実験結果—第3.5図に示した多段たい積実験装置を使用し、品種、金南風、含水比27.7%と22.5% (含水率21.7%, 18.4%) のもみをそれぞれ3段たい積して乾燥を行なった結果は第3.8図のとおりである。供試もみ量はいづれも1段当たり7Kgを使用した。乾燥経過は計算値と同様な傾向がみられるが、風量はやや多い条件下であったので、

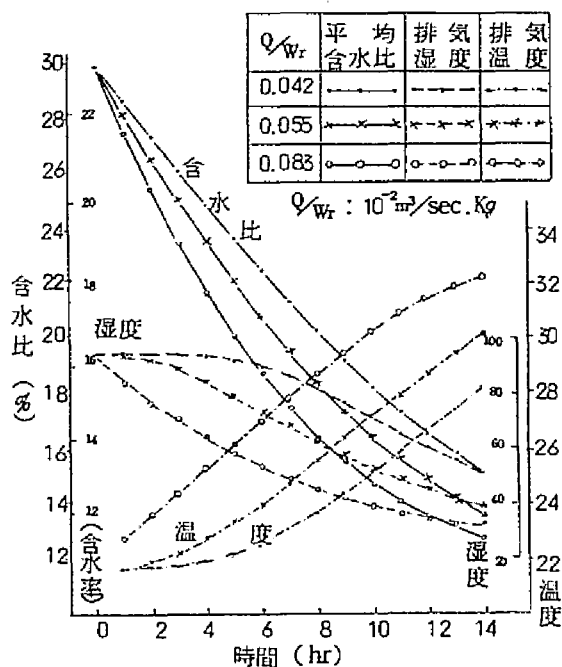
高水分もみの上層部が比較的速い速度で乾いている。

第5節 排気空気湿度の実験（実験 6）

(1) 計算値

通気空気はたい積穀物中の水分を吸収しながら通過するので、乾球温度は漸次低下し、一方湿球温度は一定であるから、排気空気の湿度は計算から求められる。

含水比29.9%のもみについて風量穀物比が変化した場合の排気湿度と平均乾燥速度を求めると第3.9図のとおりである。湿度変化は時間経過にともなって低下し、風量穀物比の大きいものほど低い湿度で排出される。また排気温度は時間経過にともなって上昇し、含水比変化と反対の傾向をとる。風量穀物比が



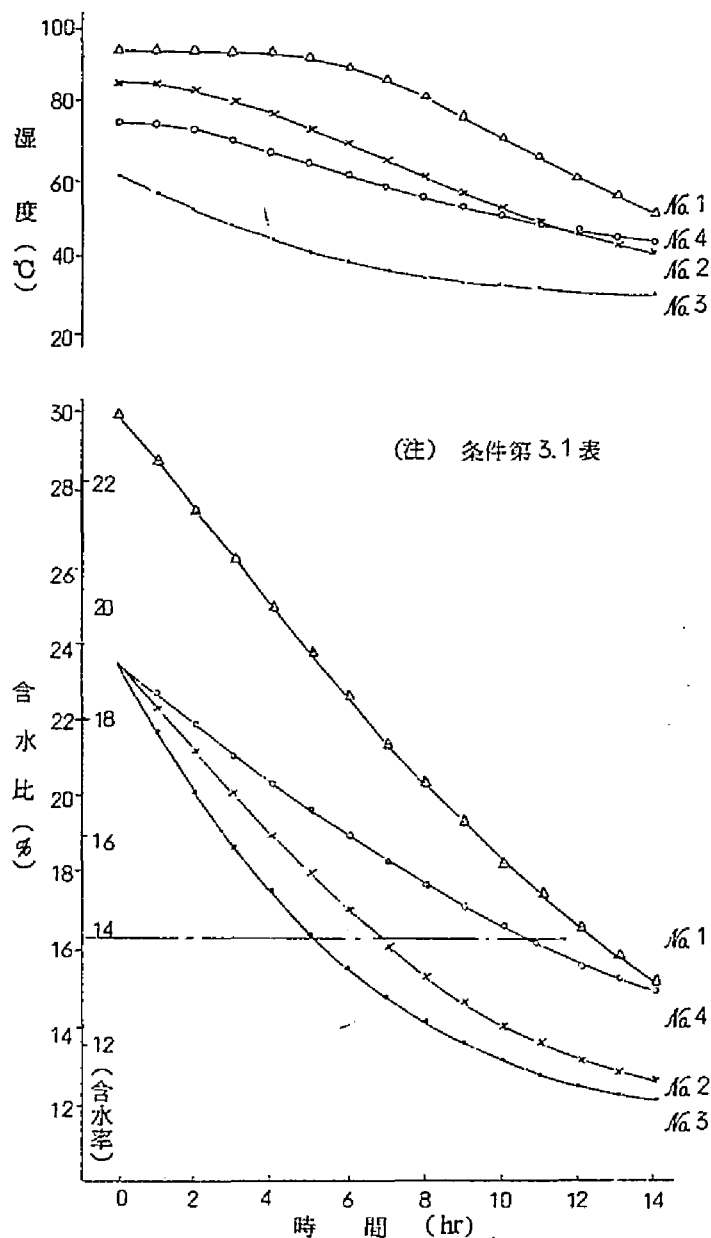
第3.9図 含水比変化と排気温度・湿度変化

第3.1表 乾燥空気と含水量の条件

	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	湿度 (%)	乾燥前水分		風量穀物比 $10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec. Kg}$
				含水比 (%)	含水率 (%)	
No 1	34.1	21.0	30	29.87	23.0	0.042
“ 2	34.1	21.0	30	23.50	19.0	0.042
“ 3	34.1	21.0	30	23.50	19.0	0.100
“ 4	27.8	16.5	30	23.50	19.0	0.042

小さいと排気湿度は高く、熱効率も向上するが、反面乾燥速度が低下する。

第 3.1 表に示す計算条件で乾・湿球温度差 (N_{a2} と N_{a4}) , 乾燥前含水比 (N_{a1} と N_{a2}) が排気湿度に及ぼす影響についてみると第 3.10 図のとおりで、水分の除去量に比例して



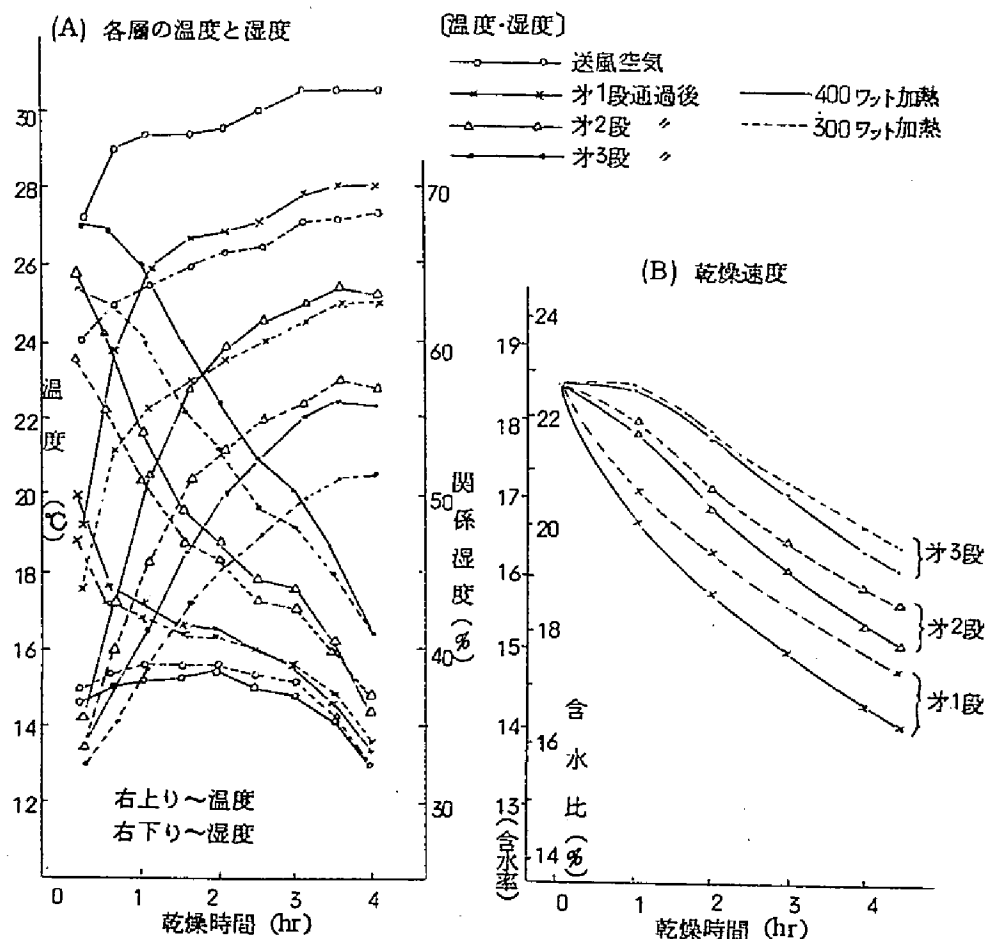
第 3.10 乾燥条件による含水率と湿度変化

排気湿度変化が生じている。

循環式は温度の高い空気を送っており、たい積層も比較的うすく熱効率が低下しやすいので、風量穀物比を静置式の約 $1/2$ としている。

(2) 実験結果および考察

多段たい積乾燥実験装置を使い、含水比 22.5% (含水率 18.36%) のもみ 21 Kg を 3 段にわけてたい積させ、加熱量を 400 と 300 ワットに区分して $0.095 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec.Kg}$ の風量穀物比で乾燥した場合の温度、湿度、含水比変化は第 3.11 図のとおりである。なお温



第 3.11 図 3 段たい積乾燥実験

度は通過空氣の温度を示し、湿度測定は電気式湿度計（横山計器製）によった。⁵³⁾

送風空氣の絶対湿度はほぼ等しい条件であるが、加熱温度の高い方が排気湿度も高く、除去水分量の多いことを示し、計算と同じ傾向である。また温度は各段で2℃前後ずつの差となつてあらわれている。

附加される熱量 (Q_i) は乾燥物のうける熱量 (Q_g)、乾燥物からの水分蒸発熱量 (Q_v)、通過空氣の残存熱量 (Q_p)、乾燥機本体の損失熱量 (Q_θ) となり次式で示される。

$$Q_i = Q_g + Q_p + Q_v + Q_\theta \quad (3.10)$$

熱風乾燥では乾燥能力や熱供給の経済性からみて乾燥にどれほど熱が利用されるか重要な問題で、水分蒸発に要する熱量と電熱器などで附加する熱量の比を熱効率 (η) とすると

$$\eta = Q_v / Q_i \quad (3.11)$$

であり、乾燥条件の異なる場合（実験10の事例）について算出すると 第3.2表のとおり

第3.2表 乾燥条件の異なる場合の熱効率

		I		II		III	
		A	B	A	B	A	B
乾燥前含水比 (%)		27.4	27.4	27.8	28.2	22.5	22.5
たい積高さ (cm)		48	48	42	42	42	42
風量穀物比 ($\times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$)		0.071	0.071	0.095	0.095	0.095	0.095
電 熱 量 (W)		200	300	400	300	400	300
発生熱カロリー (Kcal/hr)		172.80	259.20	345.60	259.20	345.60	259.20
送 風 温 度 (°C)		27~28	30~31	30~31	27~28	29~31	26~28
一段 たい積	平均除去水分 (kg/hr)	0.176	0.205	0.203	0.186	0.166	0.142
	所要熱カロリー (Kcal/hr)	101.85	118.96	117.51	107.65	96.00	82.07
	熱 効 率 (%)	58.94	45.90	34.00	41.53	27.78	31.66
多段 (3段) たい積	平均除去水分 (kg/hr)	0.195	0.233	0.245	0.223	0.199	0.175
	所要熱カロリー (Kcal/hr)	112.93	135.37	142.04	129.17	115.54	101.21
	熱 効 率 (%)	65.35	52.23	41.10	49.83	33.43	39.05

- (注) 1. 電熱器の発生熱量は864 cal/hr, Wとした。
 2. 水分蒸発に要する熱量を580 Kcal/kgとした。(送風温 30°C前後のため)
 3. 実験条件 第5.1表と同じ。

である。すなわち初期含水率が高いほど、風量穀物比が低いほど熱効率は高くあらわれる。また1段にたい積させた場合と3段にわけてたい積させた場合の比較をすると、後者は平均排気湿度が高くなるので、本例では効率が5～7%向上した。

なお熱効率は1段たい積の場合28～59%，3段たい積の場合33～65%の値を示した。

第6節 摘 要

乾燥は通風空気と穀物の水分収支、熱収支であることから、乾燥速度を多層にわけて近似計算し、かつ実験を行なって乾燥特性について検討を加えた。

(1) 温度は高いほど水分拡散係数が大きく、飽和蒸気圧も高くなるので乾燥速度が速くなる。また湿度はその温度における穀物の示す蒸気圧と空気の示す蒸気圧の差に影響される。加熱乾燥は温度と湿度を同時に変化するので、両者の影響を同時にうける。

(2) 風量穀物比はたい積乾燥時の平均速度を大きく変化せしめる。送風量を大きくすると上下の乾燥差は少なく、乾燥速度が高いが送風にともなう動力増加が甚しい。一般にたい積乾燥では風量穀物比を $0.06 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec. Kg}$ 付近にとっている。

(3) 乾燥速度は初期含水比が高いほど（他の条件は一定）速いが、上下の乾燥むらが大きくなるので、風量について考慮する必要がある。

(4) 排気湿度は風量穀物比の影響が大きく、風量を小さくすると高湿度のものが排出され、熱効率は向上するが、反面平均乾燥速度が低下する。また排気湿度は送風空気の温度、湿度、初期含水比などの影響をうけるが、水分除去量に比例して変化する。

第4章 胴われ米の発生

第1節 胴われ発生条件と測定法

(1) 発生の条件

胴われは穀物の中で米粒にのみ発生し、もみすり、精米時に碎米となる可能性が高い。したがって玄米の品質鑑定では胴われ米を被害粒としてあつかい、等級決定の重要な基準としている。






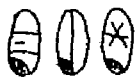
胴われ米発生の原因については一般に米粒が乾燥・吸湿・加熱・冷却により膨張・収縮作用を受けた時、機械的な衝撃作用を受けた時、また外部から種々な理化学的变化をうけた時に粒体の全組織が均一に変化しないためにおきるといわれている。この胴われ米は稲の立毛中にも発生し、肥培・管理条件によって異なり、収穫時および収穫後の処理によって発生量にかなり変化がある。

(2) 胴われ測定法

もみのまゝ胴われを検定する方法として透視法、X線照射法^{54) 55)}などがあげられるが、軽微なものは判定しにくく、もみの方向による誤差が生じやすい。したがって本実験では手むきした後、玄米透視法によって測定した。しかしこの方法でも個人差が生じやすいので、鑑定は同一人によるを原則とした。

胴われの発生状態は軽微なき裂から多条われまで多様な姿を示すので、農事試験場および農林省食糧研究所の定めた分級基準（第4.1表）によって軽胴われと強胴われにわけ、後者を被害粒としてあつかった。また胴われの発生は乾燥直後から約24時間経過するまで漸増する傾向があるので、乾燥・吸湿などの処理もみは24時間以上経過したものについて測定した。

第4.1表 胴われの分級基準（農事試，食研）

胴われ 軽微粒		米粒にわずかのき裂を認められるもの。	軽 胴 わ れ
横1条 軽度われ粒		米粒を側面からみて腹部から背部にかけて1条のき裂が入っていて背腹径の1/2以上で強度われに該当しないもの。	
横2条 軽度われ粒		米粒を側面からみて腹部から背部にかけて2条のき裂が入っている粒で横1条軽度われが1条もしくは2条あるもの。	
横1条 強度われ粒		米粒を側面からみて，腹部から背部にかけ1条のき裂が表面から中心にかけて裏面まで完全にとおったもの。	強 胴 わ れ (被害粒)
横2条 強度われ粒		米粒を側面からみて腹部から背部にかけて2条のき裂が入っていて，しかもき裂の程度が表面から裏面まですっきり通った横1条強度割の状態が1条または2条あるもの。	
多条われ粒		米粒を側面からみて腹部から背部にかけて3条以上のき裂が入っている粒，上部から下部にかけて1条以上のき裂が入っている粒，亀甲型をしたき裂が入っているもの。	

第2節 収穫前および収穫時の胴われ

(1) 収 穫 前

立毛中の胴われについては古くから多くの研究^{31) 32) 56) ~ 61)}がある。その要因として稲の熟度，出穂期の早晩，分けつ位と穂上の位置，落水時期と土性，病虫害による被害などがあげられている。

稲の熟度からみると，もみの未熟状態での胴われはほとんどみられず，米粒が充実して十分固くなっていることが条件である。未熟米や屑米となるものは外力が働いても柔軟な細胞の緩衝作用によってき裂が生じにくい。立毛中での胴われ発生の時期は刈取り適期と称される時期を過ぎてからである。もみの含水比は米粒が充実するにつれて漸次低下し，乾物重が最大となる頃から，雨や夜露などの外界の影響をうけて含水比の変動が生じるよう

になる。この頃から胴われの発生がみとめられ、含水比が28%以下になると発生率が高く、吸水作用が強く働く時に多発する模様である。

稲の熟度と胴われの関係は気温の高い時に収穫したものほど影響が大きく、収穫後35日位から急増する。しかし、中・晩稲には発生量が比較的少ない。また1株の穂でも主稈が最も多く、ついで1次分けつ、2次分けつの順となり、1穂内では黄化の早い粒ほど出やすい結果が得られている。すなわち黄化順序の早いものは早くから外界の水分影響を受けるためである。

また穂首イモチやニカメイチュウなどの病虫害の被害を受けたもの、砂壤土で早くから落水したものなどはもみの水分が早く絶ち切れやすく、乾燥・吸湿作用がくりかえし行なわれるため多く発生している。

(2) 収 穫 時

もみの脱粒は脱穀機やコンバインによるが、損傷は衝撃によるものが多い。衝撃速度による胴われ発生の関係をみるため、穀粒衝撃試験機(第2.6図)によって実験を行なった結果第2.7図に示すとおりである。もみ採取日(熟度)ともみ含水比の影響が考えられるが、中生品種で収穫後35日以上を経過した含水比26.6%~33.3%(含水率21~25%)の材料の範囲では有意差がみとめられなかった。水分の多いもみの胴われ増加は衝撃速度が速くなるにつれて増加し、比較的緩慢な上昇傾向をとるが、1,500 m/min 以上で多発している。⁴⁷⁾

動力脱穀機の周速度は500~700 m/minであり、衝撃速度による胴われは問題にする必要がないが、コンバインの周速度は1,000~1,500 m/minをとるので、若干発生の可能性がある。また含水比が少ない場合は損傷を受けやすいため多く発生するので、⁶²⁾ 機械調整に対し配慮する必要がある。

第3節 乾燥過程における胴われ

(1) 温度の影響

加熱乾燥を行なう場合、米粒には加熱による膨張と乾燥による収縮とが生じ、胴われの原因となる。垂井氏ら⁶³⁾は水分の移動がない条件下で、温度のみ急激な変化を与えた実験

を行なっているが、胴われの発生はなく、乾燥速度が主要因と結論づけられている。乾燥温度と胴われの関係を求めた報文^{9) 64)}では35℃以上になると多発するとしているが、初期高温乾燥の実験（実験1）からみるように、初期90℃以後60℃前後の熱風を送った場合でも（第2.2図参照）胴われの発生はあまり認められていない。すなわち、胴われは温度条件よりも乾燥速度の影響であり、穀物に対して送風量が十分多く、35℃になった時、乾燥速度が胴われ発生の限界値をこえたためであろう。

(2) 乾燥速度の影響

高含水比のもみを連続乾燥する場合、熱風温度34.1℃、湿度30%の空気条件の時に得られる乾燥速度（第3.6図の最下層の乾燥速度）と同等またはそれ以下が限界と推定されている。²²⁾しかしこれ以上の急激な乾燥を行なったものでも乾燥時間の短いものは胴われしていない。^{32) 65) 66)}これは粒体内部からの水分移動がある限度以下にとどまり、水分勾配が比較的小さいためである。乾燥速度がやや緩慢であっても長時間連続して乾燥する時は粒体内の水分勾配が時間経過とともに逐次増大し、乾燥によるひずみが限界に達し³¹⁾胴われするものと思われる。

一般にち密な固体を急激に乾燥すると、内部から表面への水分移動が表面蒸発にともなわず、表面乾燥によってひずみを生じ破壊がおこる。

しかし、胴われについての理論的な説明はまだみられない。V. Mises氏の説に従えば、x, y, zの3軸方向の主ひずみ成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ による $(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2$ がある一定値をこえるときに破かいがおこるとしている。

乾燥中のひずみ成分 σ は乾き初めの表面が最も大きく、平板とみなした場合において^{67) 68)}次式で示される。

$$\sigma = \frac{\eta E M_d}{1 - \mu} \quad (4.1)$$

上式中： E：ヤング率， η ：乾燥線収縮係数（線膨張係数に等しいとみなす）

M_d ：含水比， μ ：ポアソン比

この式より初期含水比の大きなもの、ポアソン比が1に近いもの、線収縮係数やヤング率の大きいものほどわれやすい。しかしこれらの数値はいずれも含水比によって変化する。

急激な短時間乾燥によって生じた水分勾配は乾燥を一時休止することにより均衡化されるので、一定時間経過後さらに短時間急激な乾燥を行なっても胴われはほとんど生じない。

しかし乾燥時間、乾燥速度、休止時間などをどのように組合せればよいかについては明らかにされていない。乾燥機を能率的に使用する時、含水比が高ければ高いほど処理能力は低下するので、生もみのごとき高含水比のものは乾燥途中に休止して水分勾配の均衡化をはかる必要がある。⁶⁹⁾

(3) 乾燥速度による胴われ実験 (実験 7)

品種、農林17号、含水比29.4% (含水率22.7%) の生もみを使い、38~40℃の条件下で赤外線乾燥を行なったが、⁷⁰⁾ 第4.2表に示すごとく含水比21%附近までは速い速度で乾かしても比較的胴われの発生が少なかったが、それ以下に乾燥する時に多発した。高水分のものを連続乾燥する時、最下層の乾燥速度は第3.6図のように最初急激な乾燥となっているが、胴われは生じていない。すなわち含水比の高い間は乾燥速度が高くとも穀粒内に発生する水分勾配が比較的緩慢で、含水比21% (含水率17.4%) 附近から急増するものと思われる。⁷¹⁾

第4.2表 乾燥速度と胴われ実験 (品種 農林17号)

区 分	生もみ含水比	乾燥含水比	所要時間	乾燥温度	胴われ率
生もみより半乾燥	29.4 % (22.7)	20.5 % (17.0)	52分	38~40℃	4.8 %
生もみより仕上乾燥	29.4 % (22.7)	14.9 % (13.0)	128分	38~40℃	98.4 %

(注) 括弧内は含水率を示す。

(4) 損傷もみの乾燥

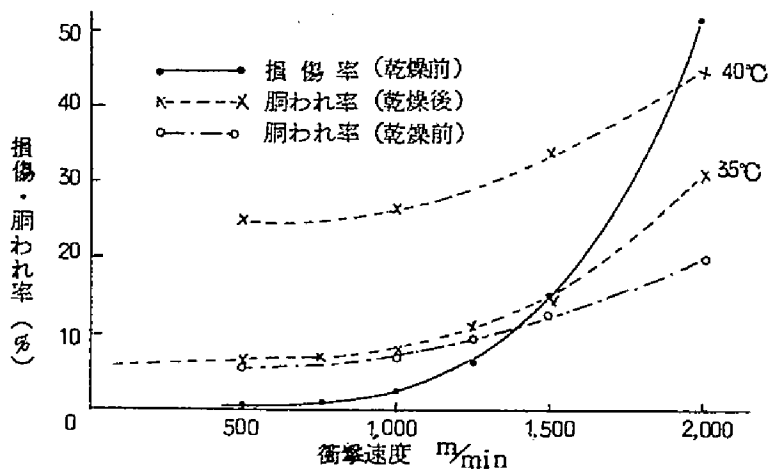
前述のように (第2章、第4節) 収穫時、もみは衝撃力をうけ損傷する。損傷粒の発生量は衝撃力の増大にしたがって増加し、乾燥速度も速くなっている。すなわち損傷をうけたものはうけないもみより粒内の水分勾配が高くなり、胴われ量が増大する。第4.3表は35℃で6時間乾燥したもみを24時間以上密封放置して測定した結果である。(実験3) この実験の場合、乾燥速度は乾燥前含水比と衝撃速度の影響が強いので、分散分析を行なって検討を加えた。

衝撃速度と胴われの関係は第4.1図のとおりであり、乾燥後のものは1,250 m/min 附近から漸次増加している。普通の収穫もみを乾燥する時、送風空気の状態条件を $T_d=35^\circ\text{C}$

第4.3表 もみ採取区分と衝撃速度別の乾燥後胴われ

もみ採取区分 \ 衝撃区分		0 m/min	500	750	1,000	1,250	1,500	2,000
No	1	0	0.	0	0	0.1	0.9	19.7
	2	0	0	0	0	0.7	1.6	1.1
	3	0	0	0	1.5	5.0	5.8	16.0
	4	0	0.1	1.1	0.9	1.4	1.9	7.8
	5	0	1.6	2.4	4.2	6.1	8.5	17.7
	6	0	1.7	2.8	4.9	6.4	8.8	9.3
	7	0	0	1.4	1.4	1.7	1.6	7.4

- (注) 1. 乾燥温度 35℃
 2. 数字は%を示す。
 3. もみは手むぎして玄米とし、胴われ検定器で測定した。

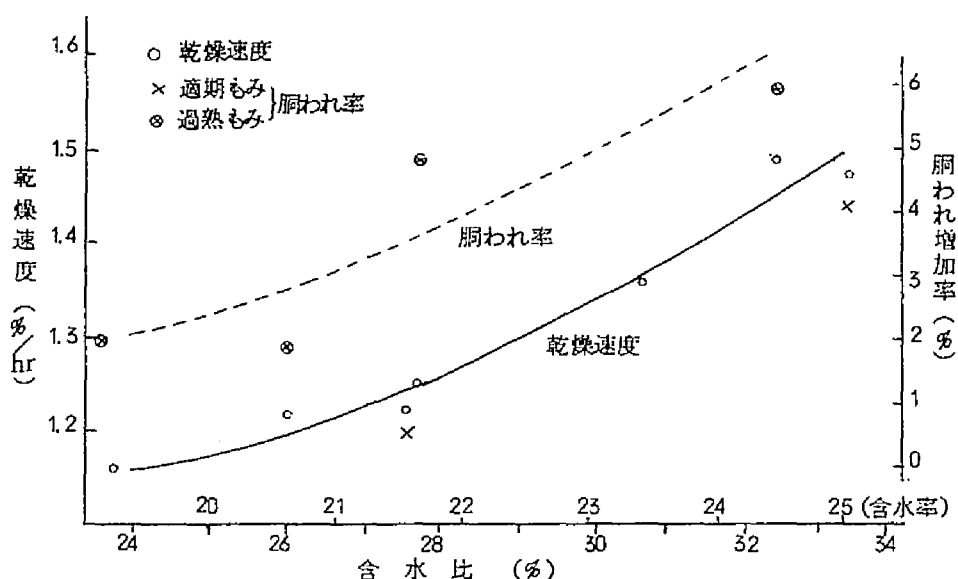


第4.1図 衝撃もみの乾燥前後の胴われ

$H_R=30\%$ にとっているが、衝撃を強くうけたものはこの乾燥条件でも胴われするので、若干乾燥速度を下げてやる必要がある。

初期含水比が乾燥速度に及ぼす影響は第4.3図のとおりで、高含水比のものは乾燥速度が高く、同時に胴われも比例的に増大する。特に刈取り適期を過ぎたものは高い胴われ率を示したが、過熟による影響と考えられる。

また40℃乾燥時においては胴われ増加が著しかったが、衝撃速度の影響よりも送風空



第4.2図 含水比による乾燥速度と胴われ増加率

気条件にもとづく乾燥速度の向上が大きい要因になっている。

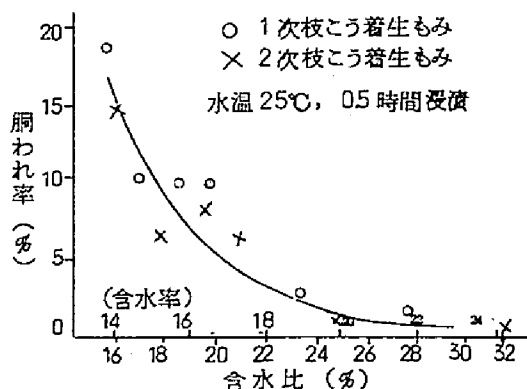
第4節 吸湿過程における胴われ

乾燥もみが雨や夜露にさらされ、また高湿度の空気にあうと吸湿する。この際粒体内に乾燥時におけると逆な膨張によるひずみが生じ、胴われとなる。吸湿時における胴われは非常に多く、米の品質を著しく低下せしめており、多くの実験結果が報告されている。

一般に発生する吸湿条件は降雨、夜露で急激に吸湿する場合と高湿空気にさらされて徐々に吸湿する二つの場合がある。

(1) 急激に吸湿する場合

長戸氏³²⁾は水分の異なるもみを15°, 25°Cの水に0.5, 3, 8時間浸漬して吸湿による胴われを説明し、第4.3図の結果を得ている。これによると含水比28% (含水率22%)以下にならないと胴われは発生せず、乾燥が進んだものほど吸湿がすみやかで胴われ発生量が非常に高いと報告し、四国幾試でもほぼ同様な結果を確認している。⁶¹⁾



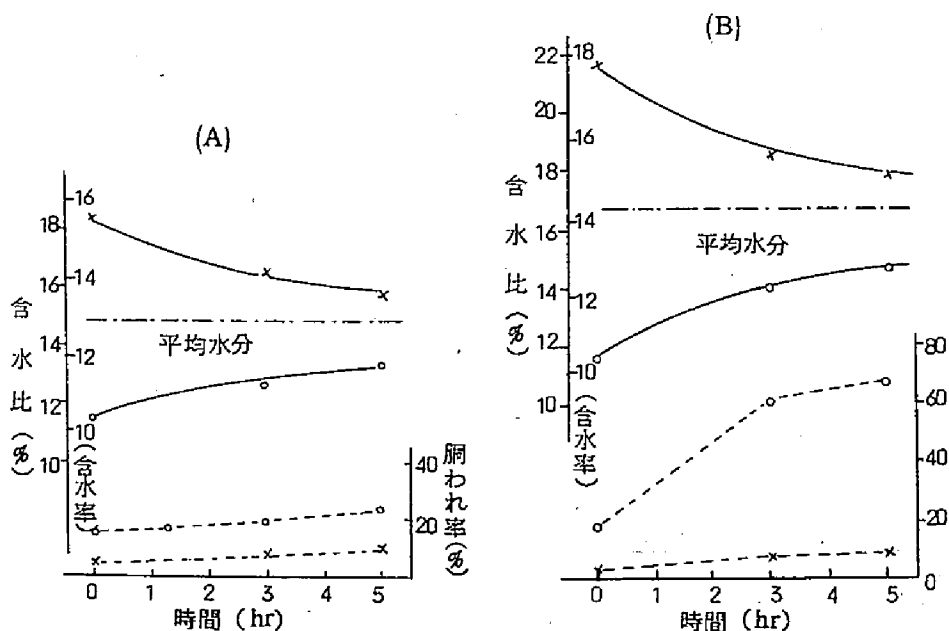
第 4.3 図 吸水による胴われ
(長戸, 1964 より作成)

(2) 徐々に吸湿する場合の実験
(実験 8)

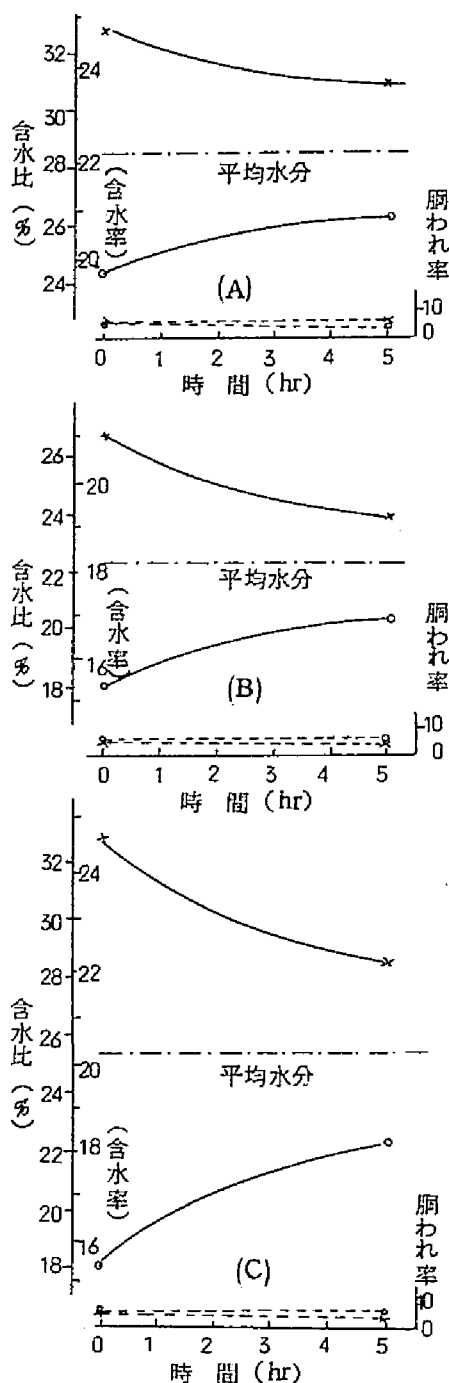
吸湿の速度が胴われに著しく影響すると考えられたので、次の実験方法によって吸湿速度を変化せしめた。ほ場から採取したもみは胴われが生じないようにゆっくり乾燥せしめて各種の段階の含水比のものとし、その中より水分の異なる二つの乾・湿もみを等量ずつ選び、混合密封して 30℃ の定温器中

に 5 時間保存した後、すばやく分離して含水比変化と胴われ増加を測定した。また材料は分離を容易ならしめるために乾・湿もみには事前に色づけを行なった。供試品種は中生新千本である。

乾・湿もみの乾燥、吸湿経過ならびに胴われ発生状況は第 4.4 図および第 4.5 図に示す



第 4.5 図 水分移行と胴われ



第 4.4 図 乾・湿もみ混合による水分移行と膨われ (高水分)

とおりである。含水比が比較的高い 19% 程度のもみは 0.8 %/hr の吸湿速度 (5 時間の平均値) で膨われ増加はほとんどなかったが、12.4% 程度に乾いたものは 0.6 %/hr の吸湿速度で約 50% の膨われ増加となった。⁷²⁾ 同吸湿作用でも含水比の領域によって、内部に生ずるひずみに差があるものと思われる。しかし含水領域における吸湿速度と膨われの関係については、まだ不明確な点が多い。Kunze 氏と Hall 氏⁷³⁾ は吸湿条件下における膨われの関係式を示し、品種、熟期、吸湿条件差などによって異なると報告している。

岡村氏⁵⁹⁾ は含水比 12.4~17.7 (含水率 11~15%) の玄米を飽和濃度で調節した湿度 60~100% の槽で吸湿実験を行ない、含水比 14% 前後のものは 0.4 %/hr 以上の吸湿速度でかなりの量が発生するとしているが、もみにはそのまま適用できない。また吸湿による膨われ原因を長、巾、厚さの方向の膨張する速さから究明し、吸湿が急激な時は巾、厚さがはやく、長さの方向がおそくなるとしている。そのため抵抗の大きな巾、長さの方向に向ってわれ目ができると結論づけている。

乾・湿もみを混合した場合、吸湿するもみに対し乾燥するもみは同じ速度で乾くが、膨われはわずかに発生した程度にとどまり、(第 4.4 図) 湿もみが乾燥する時はあまり問題とならない。

第5節 摘 要

胴われは立毛中は勿論、収穫時・乾燥時・貯蔵時にも発生する。発生原因として温度変化・強い衝撃力・乾燥および吸湿作用によるものなどがあげられるが、多発する要因は乾燥・吸湿にともなう収縮・膨張であり、この作用で穀粒体にひずみが発生する結果である。

乾燥過程でみると連続乾燥時は粒体内の水分勾配が時間経過とともに漸次増大し、ある限界を越すと胴われをおこす。この時の乾燥速度限界は $\times T_d = 34.1^\circ\text{C}$ 、 $T_w = 21.0^\circ\text{C}$ 、 $H_R = 30\%$ の空気条件とされている。しかし乾燥途中何回か休止し、水分勾配の均一化をはかりながら乾かすテンパリング方式はこれ以上の速い速度で乾燥しても胴われは生じないが、乾燥速度・乾燥時間・休止時間などの範囲については明確でない。

吸湿過程では雨・露による急激な吸湿と高湿空気にさらされて徐々に吸湿する場合があるが、前者は28%以下の含水比になってわれ始め、乾燥が進むほど吸湿がはやく、胴われの発生率も高い。後者で半乾燥もみが0.8%/hr程度の吸湿速度で水分を吸う場合胴われは生じないが、15%前後の低い含水比になると吸湿速度がおそくとも相当量の胴われが発生する。したがって一度乾いたもみは吸湿させないことが大切で、かつ過乾防止の配慮が必要である。

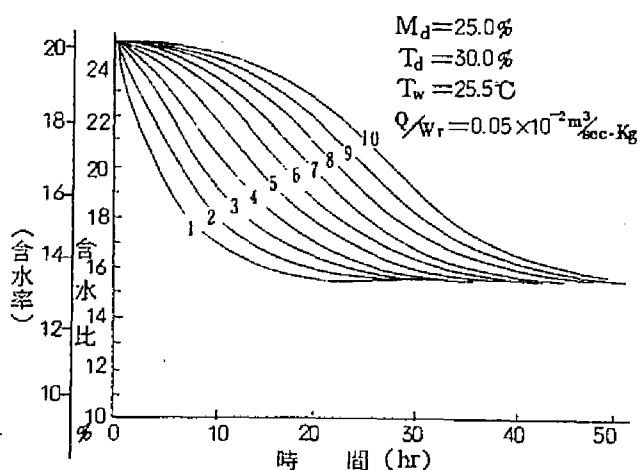
第5章 乾燥むらと水分移行

第1節 乾燥むら発生の実験 (実験 9. 10)

(1) 計算値

たい積乾燥状況は近似計算法で明らかにしたように、穀物層を空気が通過する際に、空気は穀物より蒸発する水分を逐次吸湿しながら移動するので、上層にゆくにつれて乾燥能力の低い空気となり、乾燥むらが発生する。

むら発生の程度は送風空気の条件と穀物より除去する水分量によってかなりの差がある。乾燥むらに影響する要素は乾燥速度と同様であり、4段区分のたい積乾燥計算例でみると第3.2図、第3.3図、第3.6図、第3.7図のとおりである。一定の含水比まで乾かす場合、温度の高いほど、また湿度が低いほど、風量穀物比が小さいほど、初期含水比が高いほどむらの発生は大きい。むらを減少させる手段として温度低下、湿度上昇が考えられるが、乾燥に長時間かかる。例えば過乾燥を防ぐため平衡含水比が15.6% (含水率13.5%) になる空気で乾燥すると、第5.1図 (10層区分で計算) のとおりで、もみ水分は下層から平衡含水比に達し、漸次上層へと平衡層が移動するので、乾燥むらは解消されるが、長時



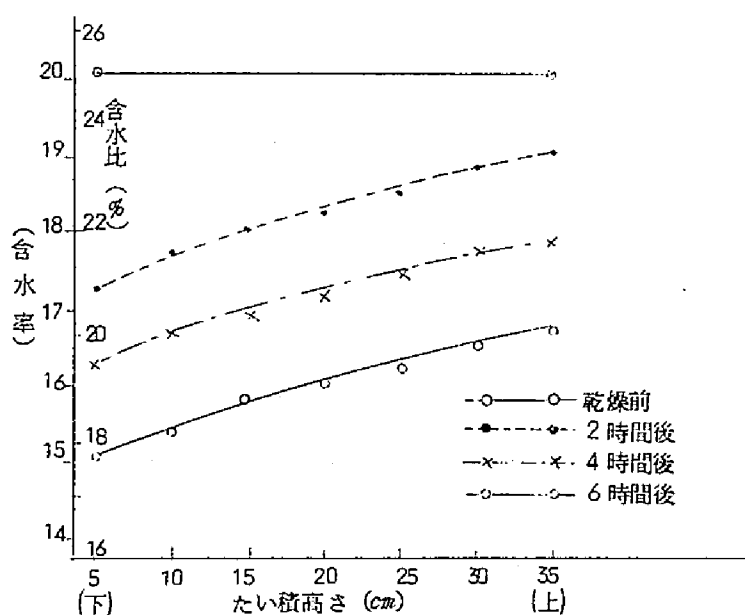
第 5.1 図 たい積層別・含水比の経時的変化

間かかる欠点がある。風量穀物比を高くとる場合は乾燥むら解消に効果的であるが、薄くたい積する時は場所を多く必要とし、またたい積層を厚くする時は消費動力が著しく増加する。

(2) 実験結果および考察

多段たい積乾燥実験装置（第 3.5 図）を使って乾燥むら水分勾配の発生状況（実験 9）と 3 段たい積乾燥時，送風条件や初期含水比をかえた場合の実験（実験 10）⁷³⁾ 結果は次のとおりである。

乾燥むら水分勾配 — 初期含水比 26.1%（含水率 20.7%），たい積高さ 35 cm のもみに送風温度 26~27℃，湿度 0.06 Kg/Kg，風量穀物比 $0.095 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$ の空気を送り，5 cm 間隔に水分測定した。乾燥経過は第 5.2 図のとおりで，送風空気や含水比などの条件



第 5.2 図 たい積乾燥時の乾燥むら発生過程

によって異なるが，静置式乾燥ではおむねこの程度の乾燥むらを生じている。⁷⁴⁾

送風温度差の影響 — 湿度 0.007 Kg/Kg の空気を 200~400 W の電熱器で加熱通風した結果は第 5.1 表および第 3.4 図のとおりである。すなわち乾燥能力の高い空気ほど乾きむらが生じやすいことを示している。

風量穀物比の影響 — 第 5.1 表（Ⅰ-B と Ⅱ-A との比較）の如くであるが，初期含水比と平均水分値に差があり，はっきりした結果が得られなかった。Ⅱ-A の方が除去水分が多いにもかかわらず，乾燥むらに差がないのは風量が多いためである。

初期含水比の影響 — 第 5.1 表（Ⅱ と Ⅲ の比較）および，第 3.8 図に示すとおり，乾燥

前の水分の多いものほど乾燥むらが大きくなっている。

第 5.1 表 多段たい積乾燥における各段別乾燥速度 (3 段)

		I		II		III	
		A	B	A	B	A	B
乾燥前含水比 (%)		27.39	27.39	27.80	28.21	22.49	22.49
たい積もみ量 (Kg)		24	24	21	21	21	21
たい積高さ (cm)		48	48	42	42	42	42
送風量 (m^3/s)		0.017	0.017	0.020	0.020	0.020	0.020
風量穀物比 *		0.071×10^{-2}	0.071×10^{-2}	0.095×10^{-2}	0.095×10^{-2}	0.095×10^{-2}	0.095×10^{-2}
電熱量 (w)		200	300	400	300	400	300
送風温度 ($^{\circ}C$)		27~28	30~31	30~31	27~28	29~31	26~28
運転時間 (hr)		6.5	6.5	6.5	6.5	4.5	4.5
第 1 段	平均水分	18.85	17.38	16.20	17.67	16.31	17.28
	下層 (M_1)	17.92	16.58	15.18	16.81	15.92	16.75
	上層 (M_2)	19.56	18.23	16.70	19.09	16.72	17.62
第 2 段	平均水分	20.63	19.75	18.57	19.77	17.81	18.50
	下層 (M_2)	19.56	18.23	16.70	19.09	16.72	17.62
	上層 (M_3)	21.80	19.80	19.13	—	18.26	19.08
第 3 段	平均水分	23.00	21.98	20.76	21.69	19.16	19.60
	下層 (M_3)	21.80	19.80	19.13	—	18.26	19.08
	上層 (M_4)	23.32	21.89	21.14	—	19.43	19.88
第 1 段上下層の差 (D_1)		1.64	1.65	1.52	2.28	0.80	0.87
最下層と最上層の差 (D_2)		5.40	5.31	5.96	—	3.51	3.13
第 1, 3 段平均水分差		4.15	4.60	4.56	4.22	2.85	2.32
$D_1/D_2 \times 100$		30.4	31.1	25.5	—	22.8	27.8

* 風量/たい積もみ量を示す, 単位 $m^3/sec.Kg$

- 注) 1. 平均水分は乾燥前水分測定値から重量減にともなって計算した含水比。
 2. M_1, M_2, M_3, M_4 は水分測定による含水比。
 3. 湿度は絶対湿度 $0.007 Kg/Kg$ である。

第2節 貯蔵中における水分移行実験¹¹⁾ (実験 11)

(1) 実験方法

内のり30cm×30cm、高さ40cmの木製箱下面に金網を張り、中にもみを35cmたい積させ(もみ重17.5kg)、電熱器で加熱した空気を送って、水分勾配がほぼ一様な乾燥むらを発生せしめ、上下面を板でふさぎ外気と遮断した。側面には5cm間隔にサンプル取出口を設け、乾燥直後から120時間後まで7回にわたって水分検定用のもみを採取し、水分移行量を測定した。

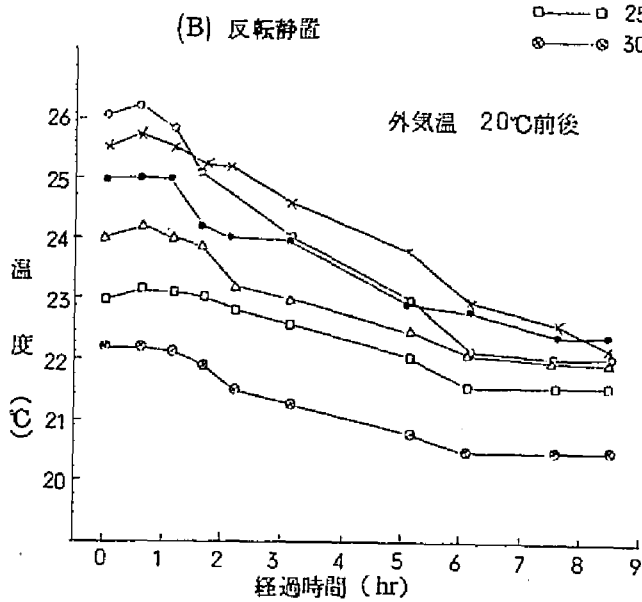
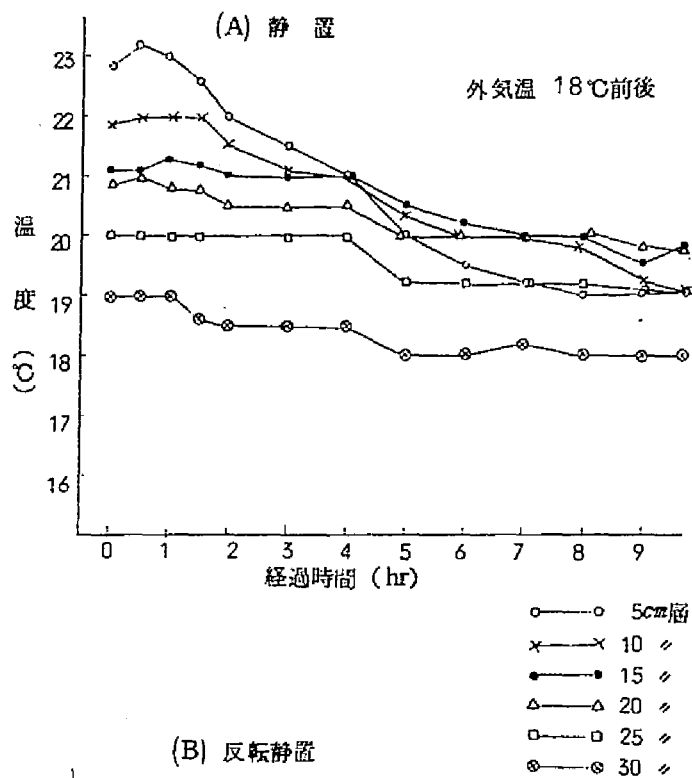
乾燥直後のもみは第5.3図に示すように上・下層間に約4℃の温度差があり、温度の影響を検討するため板で密閉後、そのまま静置したものと反転静置した2区について実験を行なった。供試品種は金南風で、吹上選別機を通した良質もみを使用した。(第5.2表参照)

第5.2表 供試もみの条件 (品種 金南風)

もみの条件 実験名	最上層 含水比(%)	最下層 含水比(%)	含水比差 (%)	水分勾配 (%/cm)	備考
① 乾燥むらの経時的変化	19.59	16.69	2.90	0.083	正置 たい積 逆転 35cm
	14.81	18.42	3.61	0.103	
もみの条件 実験名	湿もみ 含水比(%)	乾もみ 含水比(%)	含水比差 (%)	平均 含水比(%)	保存温度 含水差
② 層接触水分移行	17.93	14.35	3.58	16.14	20℃ 小
	18.06	11.24	6.82	14.65	
	17.88	10.26	7.62	14.07	35℃ 大
③ 混合接触水分移行	18.15	13.70	4.45	15.93	27℃ 小
	19.62	11.77	7.85	15.72	
	18.46	13.46	5.00	19.96	常温 27℃ 35℃
	19.23	14.07	5.16	16.65	
	18.41	13.38	5.08	15.92	

(2) 結果および考察

もみ層の温度変化は第5.3図のように時間経過にともなって下降し、静置・反転とも同



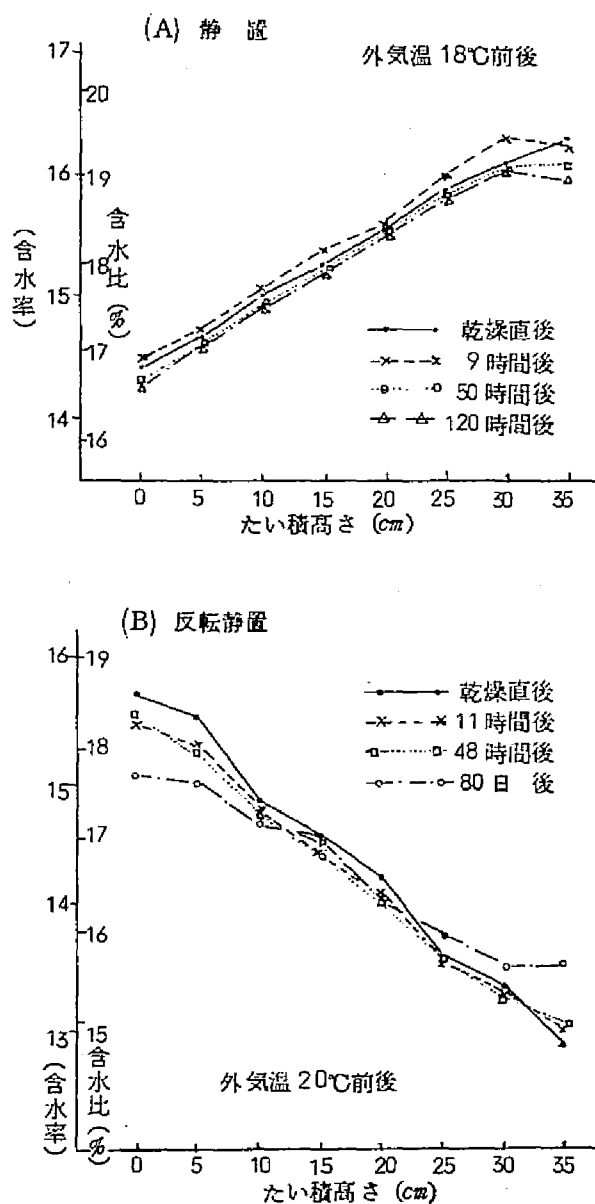
第5.3図 たい層中の温度変化 (貯留中)

様な傾向を示した。

乾燥むら水分勾配をたい積高さに対する含水比で表示すると、乾燥直後Aは $0.08\%/cm$ 、Bは $0.10\%/cm$ 発生した。これらの経時的变化をみると第5.4図のとおりで、長時間経過

しても水分移行は認められず、また静置・反転による差も認められなかった。しかし最上層部は外気による若干の影響があらわれた。

B区は実験終了後上に簡単なふたをし、下は板に接したまゝの状態⁷⁶⁾で83日間(自1964.12.9至1965.3.2)放置したところ、外界の影響が約10cm深さにおよんだ。一般にたい積乾燥時に発生する含水比勾配は $0.1\%/cm$ 以下であり、この程度の水分勾配では空気がもみ中を流れない限り水分移行はないものと考えられる。乾燥むらのあるもみが貯留中にかなり水分移行したとの報文があるが、試験法に問題があるものと思われる。

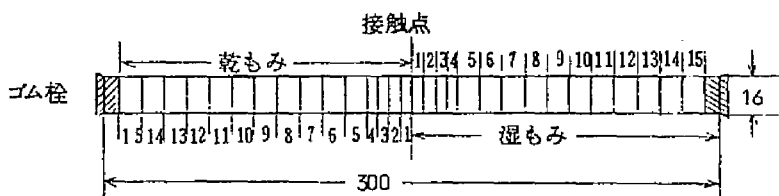


第5.4図 乾燥むらの経時的变化

第3節 乾・湿もみ層接触による水分移行実験⁷⁷⁾ (実験 12)

(1) 実験方法

前節で述べたような含水比勾配では水分移行が認められなかったもので、その限界を知るため水分の異なる試料を層接触せしめて経時的に水分移行量を測定した。まず乾・湿もみは1区当たり25粒または50粒ずつに30区分し、0.1mg感度の精密天秤で計量後、第5.5図に示すガラス管内に入れてゴム栓で密閉した。封入後の試料は20°、35℃の定温器内に保存し、15、40、70、120、170時間後に取出し、各層ごとに分離して計量した。各層ごとの区分もみは分離を容易ならしめるため事前に色づけを行なった。また詰め込み密度は乾物重換算0.55g/cm³で、含水比測定は供試前のもみについて検定し、水分移行量は重量変化によって算出した。(供試もみの条件は第5.2表に示した。)



第5.5図 乾・湿もみ層接触実験

(2) 結果および考察

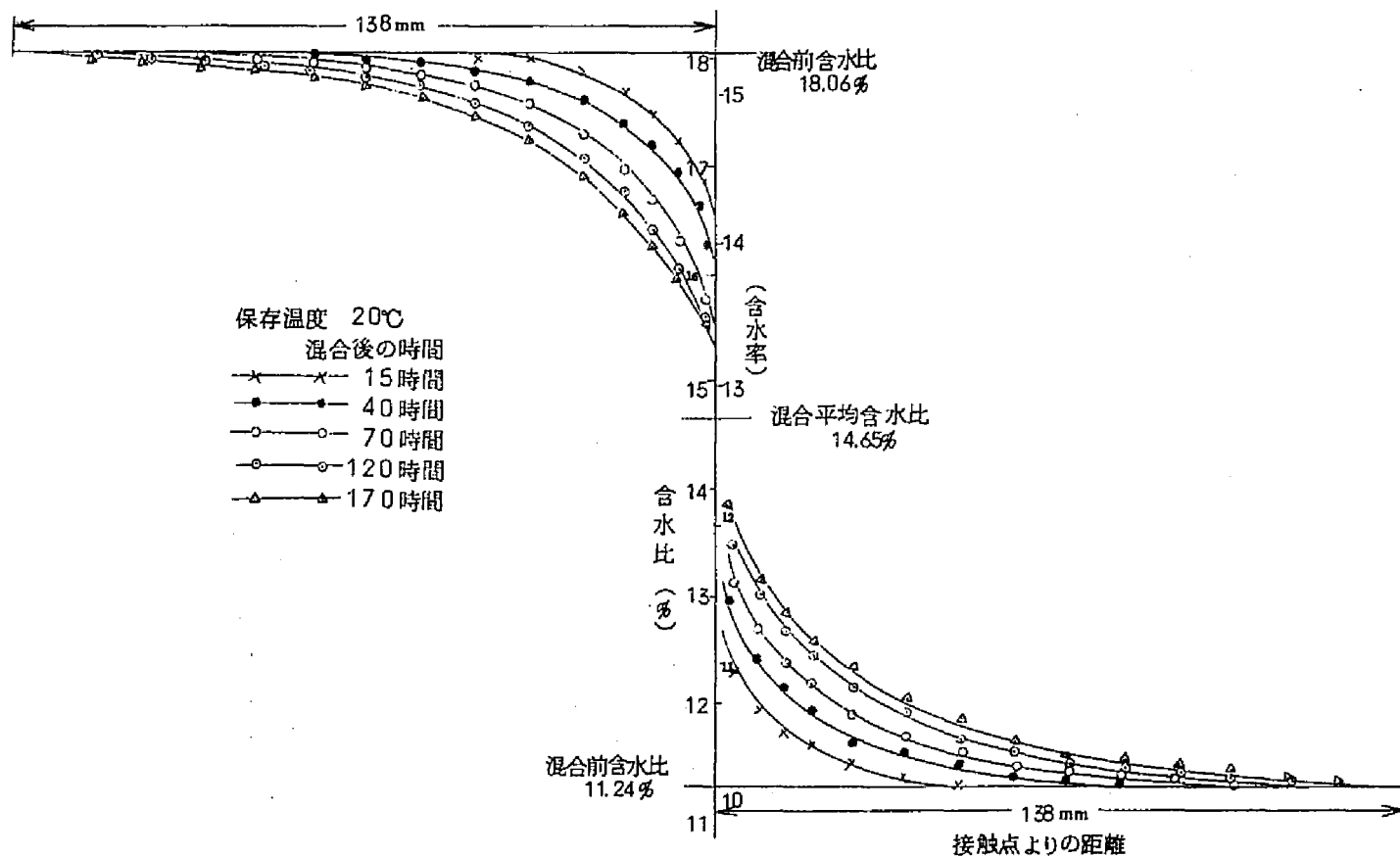
乾・湿もみ層接触後の水分移行を時間経過でみると、第5.6図のとおりで、接触時間が長くなるにつれて移行量が増大している。また混合前の含水比差や保存温度に差があった場合、接触170時間後の移行量は第5.7図のとおりとなり、保存温度、混合前の含水比によって異なる。

水分移行量 V_{q1} を式で示すと固体と流体間の熱伝達と同様な関係式が成り立つ。⁷⁸⁾

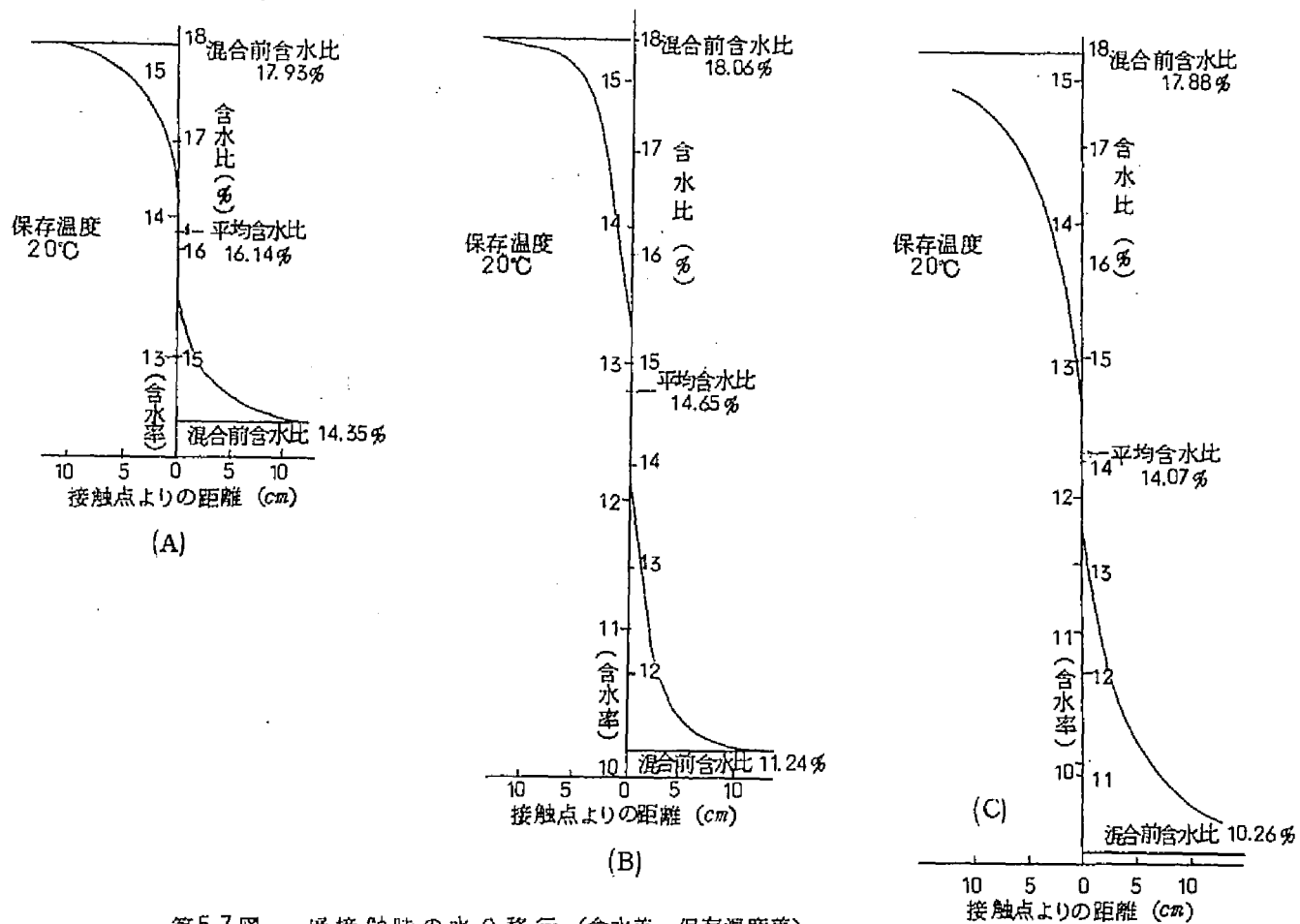
$$V_{q1} = K_{y1} A (WM - DM) \quad (5.1)$$

上式中： V_{q1} ：層接触時の水分移行量 ($10^{-4} g$) A ：接触面積 (cm^2)
 WM ：湿もみ含水比 (%) DM ：乾もみ含水比 (%)
 K_{y1} ：層接触の水分移行係数 ($g/cm^2 \cdot \%$)

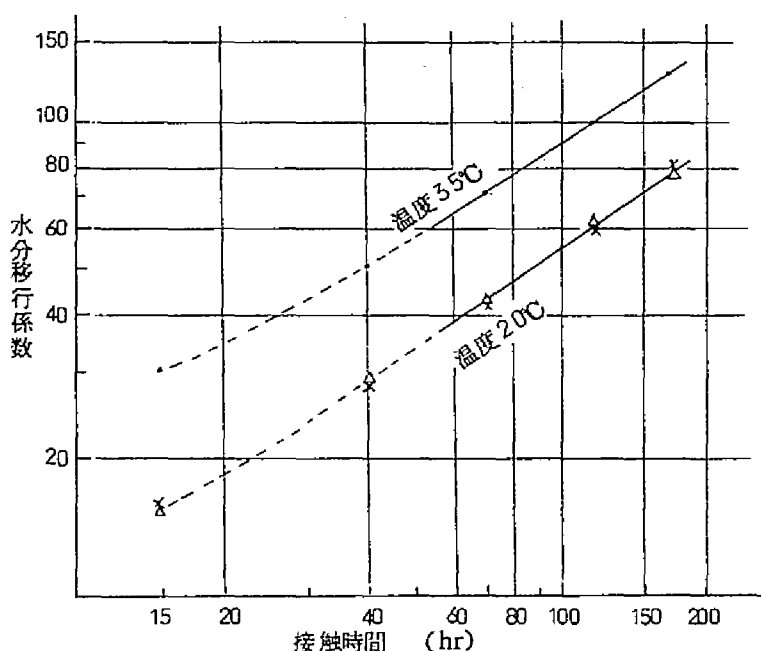
各時間経過における水分移行係数を求め、両対数グラフ上に画いてみると第5.8図のと



第 5.6 図 層接 触 時 の 水 分 移 行 (接 触 時 間 の 差)



第5.7図 腐接触時の水分移行 (含水差, 保存温度差)



第5.8図 腐接触時の水分移行係数

おりで、40時間経過後では接触時間が長くなるにつれて単位当たりの移行量が漸減し直線となってくるが、それ以前は時間には \propto 正比例して水分移行がなされた。すなわち接触当初の移行は単位時間当たり比較的多いが、漸次減少し、関係式は次のとおりである。

$$\text{接触初期} \quad K_{y_a} = a + bx \quad (5.2)$$

但し $15 < x < 70 \text{ hr}$, a, b は温度によって定まる常数

$$\text{接触中期以降} \quad K_{y_b} = C_3 x^\alpha \quad (5.3)$$

但し $70 < x < 170 \text{ hr}$

(5.1) 式の K_{y_i} に (5.2), (5.3) 式を入れると,

$$V_{q_a} = (a + bx) A(WM - DM) \quad 15 < x < 70 \text{ hr} \quad (5.4)$$

$$V_{q_b} = C_3 x^\alpha A(WM - DM) \quad 70 < x < 170 \text{ hr} \quad (5.5)$$

x : 接触時間 (hr)

V_q, K_y の添字はそれぞれ条件が異なる場合を示した。

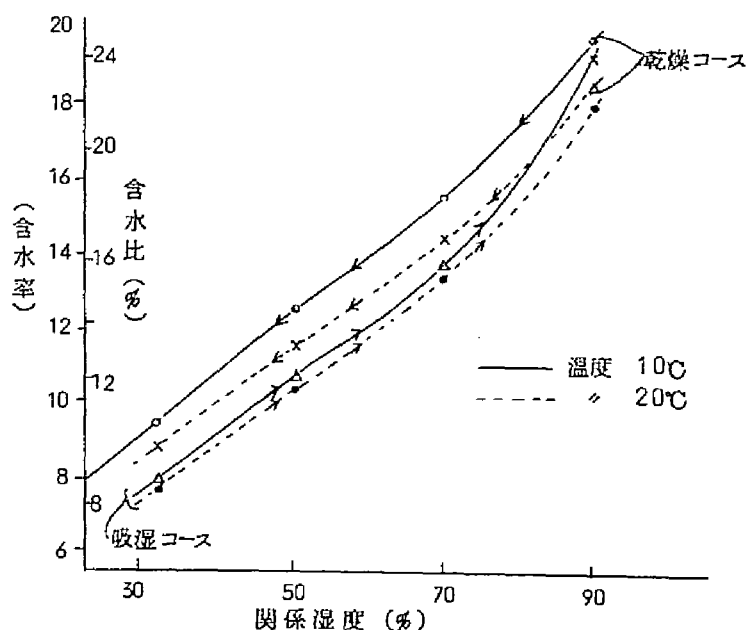
$C_3 (\text{g/hr} \cdot \text{cm}^2 \cdot \%)$ および α は温度によって定まる常数であり、本実験の条件下では

第 5.3 表 腐接触時の実験式と常数值

温 度	常数值		K _{ya} = a + b x		K _{yb} = C ₃ x ^α	
	a	b	C ₃	α		
20℃	7.46	0.52	3	0.626		
35℃	19.26	0.75	5	0.626		
備 考	15 < x < 70 hr		70 < x < 170 hr			

第 5.3 表に示す値をとった。

第 5.6 図、第 5.7 図で接触点は 170 時間経過後でも乾・湿もみの平均含水比に達せず断層を保ったまゝ、ほぼ平衡状態に達している。すなわちある限度以上は水分移行がなされないことを示しており、第 5.9 図にみるように平衡水分値に乾燥コースと吸湿コースがあり、同じ空気湿度条件で二つの平衡状態が共存するからである。



第 5.9 図 乾燥、吸湿コースの平衡水分

この接触点の含水比勾配は 1 %/cm (第 5.7 図 A 事例) であり、かなり高い勾配で保持されている。第 5.4 図のたい積乾燥過程で発生した乾燥むらが貯蔵中に水分移行しない理由も

この乾燥・吸湿コースの差にもとづくものである。また前述の乾燥むら経時変化で外界の影響が約10 cm 深さあらわれていたが、層接触による影響深さは20℃でほゞ10 cm あり、この実験からも推定できる。

第4節 乾・湿もみ混合接触による水分移行実験⁷⁷⁾ (実験 13)

(1) 実験方法

精もみ約6 g ずつ計量して一対の混合用のもみを準備し、一方は色付けした後乾燥機で乾かして乾もみ材料とした。乾・湿もみは精密天秤で計量後、よく混合して秤量びんにほゞ満量となるように入れて密閉し、常温(17°~23℃)、27℃、35℃の各温度に保存した。5、12、24、48 時間後に取り出し、デシケータ中で冷却し、すばやく分離して計量した。供試もみの水分が特に多いか、少ない材料を使用すると乾・湿もみの分離作業中に水分が移行するので、外気の平衡水分条件と乾・湿もみの平均含水比がほゞ等しい材料を中心に実験した。それでも若干蒸発損失の生じたものについては、損失内訳を分析して補正を加えた。

またもみ間隙をしめる空気との間の水分移行量はごくわずかで無視できる程度であった。(供試もみ条件 第5.2表のとおり)。

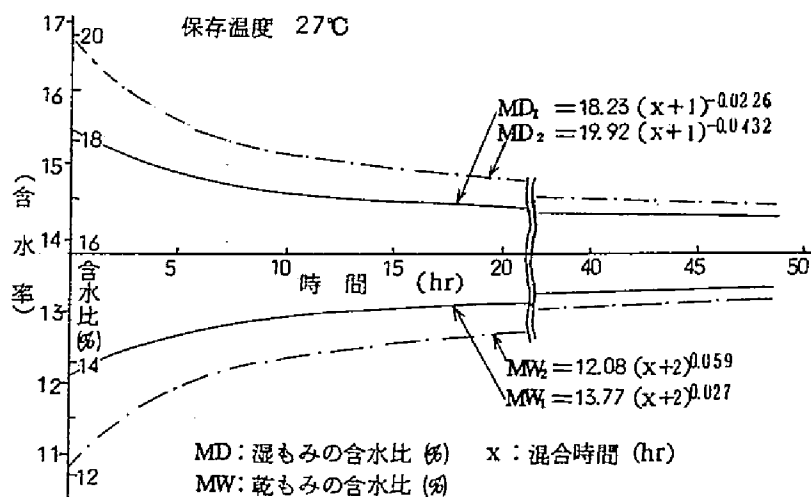
(2) 結果および考察

含水比差の影響 — 含水比差4.46%, 7.84%, 平均含水比16%のものについて混合後の水分移行をみると第5.10図のとおりである。

混合初期急速に水分移行が行なわれ、漸次緩慢になる。移行速度は水分差が大きいほど著しく、この水分移行を実験式で示すと第5.4表のとおりである。……(5.6)式⁷⁹⁾

水分移行は時間経過とともに平均含水比に接近するが、50 時間後でもいっくら残り、150 時間まで測定を継続したが、含水比の差はい然解消されなかった。すなわち乾・湿もみ含水比の接近は前実験と同様、乾燥・吸湿コースが異なるためで、接近限界はその時の温度や含水比の影響をうける。

保存温度差——含水比のほゞ等しいもみを常温、27℃、35℃中に保存し、水分移行状況をみると第5.11図のとおりで、実験式は第5.4表の如く示される。……(5.7)式



第 5. 10 図 混合時の水分移行 (温度一定)

第 5. 4 表 乾・湿もみ混合接触水分移動の実験式

実験式		吸 湿 コ ー ス	乾 燥 コ ー ス	備 考
含水比差	乾もみ 13.77% 湿もみ 18.23%	$MW_1 = 13.77 (x+2)^{0.027}$	$MD_1 = 18.23 (x+1)^{-0.0226}$	(5.6) 式
	12.08 19.92	$MW_2 = 12.08 (x+2)^{0.059}$	$MD_2 = 19.92 (x+1)^{-0.0432}$	$x < 50$
温度条件差	常温 (17~23℃)	$TW_1 = 13.47 x^{0.0285}$	$TD_1 = 18.53 x^{-0.0221}$	(5.7) 式
	27℃	$TW_2 = 13.47 (x+5)^{0.0285}$	$TD_2 = 18.53 (x+4)^{-0.0221}$	$8 < x < 50$
	35℃	$TW_3 = 13.47 (x+5)^{0.0385}$	$TD_3 = 18.53 (x+4)^{-0.0297}$	

(注) MW, TW: 乾もみ含水比 MD, TD: 湿もみ含水比

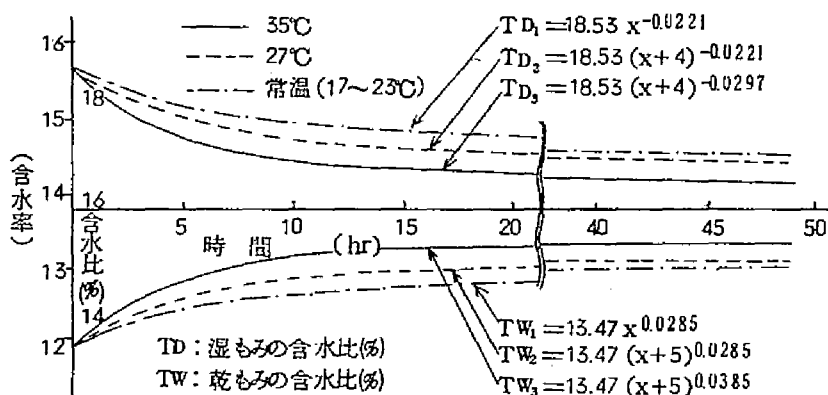
温度が高いほど水分移行速度が速く、かつ平均水分値への接近度合いが高い。これは第 5.9 図でみたように温度の高い方は乾・湿コース間隔が少なくなるためである。

湿もみから乾もみへの水分移行量を式でみると次のとおりである。

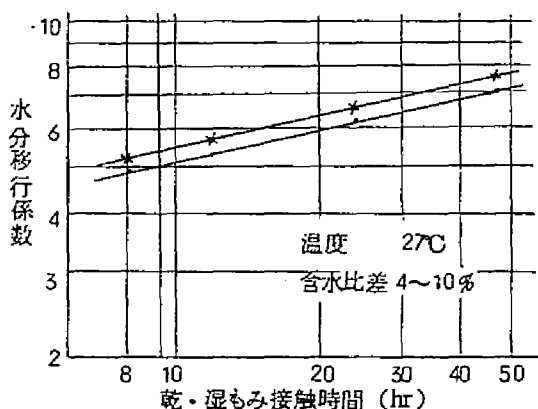
$$V = K_{y2} (F \cdot WM - J \cdot DM) \quad (5.8)$$

上式中: V: 混合接触時の水分移行量 (Kg) F: 湿もみの乾物重 (Kg)

K_{y2} : 混合接触時の水分移行係数 (%⁻¹) J: 乾もみの乾物重 (Kg)



第 5. 11 図 混合時の水分移行 (水分一定, 温度差)



第 5. 12 図 混合接触時の水分移行係数

乾・湿もみの水分量の差に比例して移行量がきまるが, 移行係数は保存温度と接触時間によって変化し, 第 5. 12 図のように両対数グラフ上で直線となるので, (5. 8) 式は次の一般式で示される。

$$V = C_4 x^\beta (F \cdot WM - J \cdot DM) \quad (5.9)$$

但し, $8 < x < 48 \text{ hr}$,

$$4\% < (WM - DM) < 10\%$$

$C_4 (\text{hr}^{-1} \cdot \%)^{-1}$, β は保存温度

と経過時間によって定まる常数であり, 27°C の実験では $C_4 = 1.5 \sim 1.6$, $\beta = 0.028$ であった。

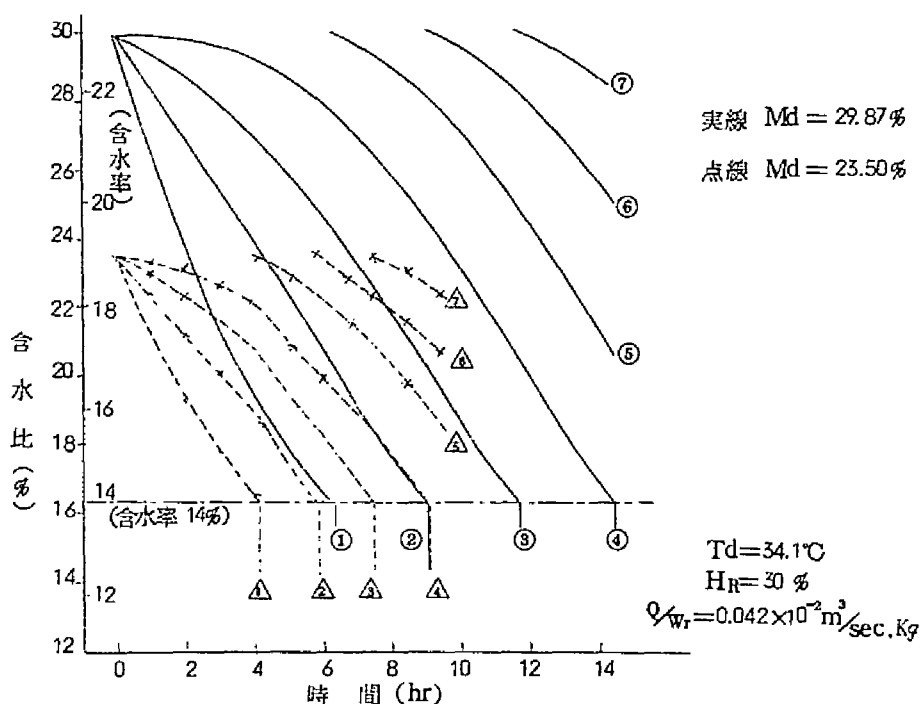
層接触水分移行の実験では初期, 時間経過に正比例した水分移行が認められたが, 混合接触においても混合当初の短時間この傾向があった。

混合による水分移行は乾・湿もみの平衡水分に達するまで行なわれるので, 乾燥むら防止は可能であるが, ある限界以下 (常温で湿量基準 約 0.5%) にすることはできない。

第5節 多段たい積，下層排出法による乾燥むら防止

(1) 3～4段たい積

たい積乾燥では第3.2～3.11図でみたように乾燥むらが発生する。したがってこのたい積層を何区分かして，乾いた下層より取り出す方式にすると乾燥むらを減少せしめることができる。取り出す層が薄ければ薄いほど，乾燥むらが少なくなるが，構造が複雑となるので品質に影響をおよぼさない程度に段数を少なくする必要がある。



第 5.13 図 4 段たい積，下段排出乾燥の経過

第 5.13 図は 4 段たい積時，最下段の平均含水比が 16.28% (含水率 14.0%) に乾いた時とり出し，最上段には未乾燥のもみを新たにたい積する方法を採用した乾燥経過 (近似計算値) である。最下段の穀物を排出する時，その段の上，下層の乾燥差は空気条件，風量，初期含水比などによって支配される。第 3.1 表に示した乾燥条件の下で乾かした場合の乾燥むらは (最下段排出時) 第 5.5 表の如くである。すなわち最上，最下層の水分差の 1/4 以下の乾燥むらの範囲にとめ得られるが，許容されるむらは含水比で 0.7% (含水

第 5.5 表 乾燥むら

(計算値)

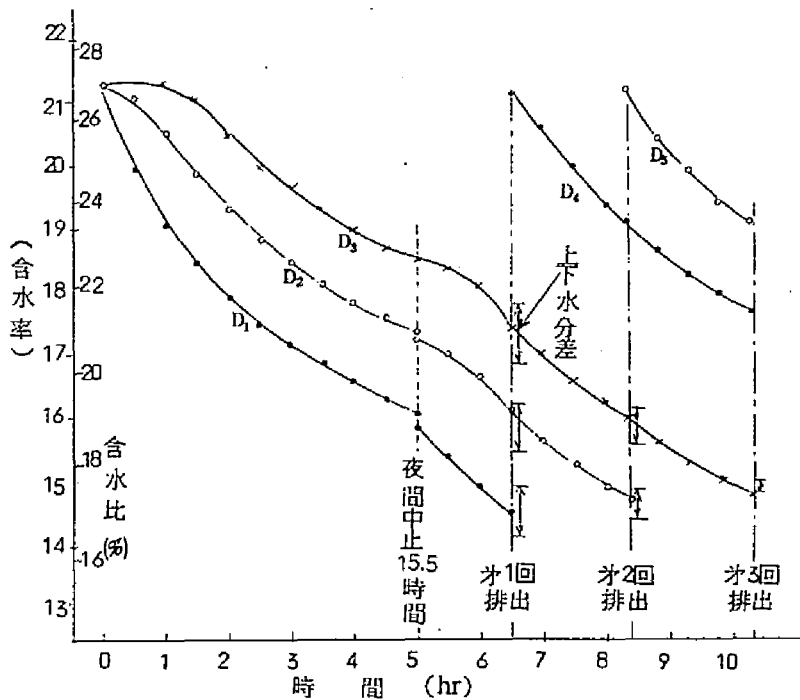
	全層の平均含水比 16.28% の時の上下差			4 段たい積時における 排出各段の上下含水比差	備 考
	最 下 層	最 上 層	差		
層 1	12.03%	22.51%	10.48%	2.5% ~ 2.6%	乾燥終了時の 平均含水比を 16.28%とした
2	13.14	19.96	6.82	1.5 ~ 1.6	
3	13.74	18.01	4.27	0.7 ~ 0.8	
4	14.13	18.72	4.49	1.0 ~ 1.1	

(注) 計算条件は第 3.1 表による。

率 0.5%) といわれており、風量の少ない計算事例ではやゝ高い値を示した。

3 段たい積時の乾燥むら実験 (実験 10) での成績は第 5.1 表のとおりで、半乾燥もみは比較的低い含水比差 0.8 % を示したが、生もみはかなり高い値となった。しかし 3 段たい積によって最上、最下層水分差の $1/3$ 以内にとどめることができた。

(2) 3 段たい積排出時混合実験 (実験 14)



第 5.14 図 多段たい積による乾燥むら防止, 乾燥経過

多段たい積乾燥で上層にあるものは逐次下層に移されるが、移動の手段としてシャッター開閉による自由落下法をとると、かなりの混合作用がある。最下段排出時、上段にあるものをそれぞれ混合して下段に移す実験を行なった結果は次のとおりである。

第3.5図に示した実験装置にもみを3段たい積し、含水比2.69%（含水率2.12%）、風量穀物比 $0.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec.Kg}$ 、送風温度 $27 \sim 28^\circ\text{C}$ 、湿度 0.005 Kg/Kg の条件で乾かし、下段排出時に中、上段を混合して乾燥を続行する方法で実験した。第5.14図および第5.6表は含水比の変化を示したが、第1回排出のものは混合がなかったため上下間に1.04%の差を生じ、第2回排出0.65%、第3回排出0.18%と混合回数が増加するにつれて乾燥むらは減少した。乾燥過程中2回程度の混合作用があると乾燥むらは心配する必要がない。

第5.6表 多段たい積による乾燥むら防止

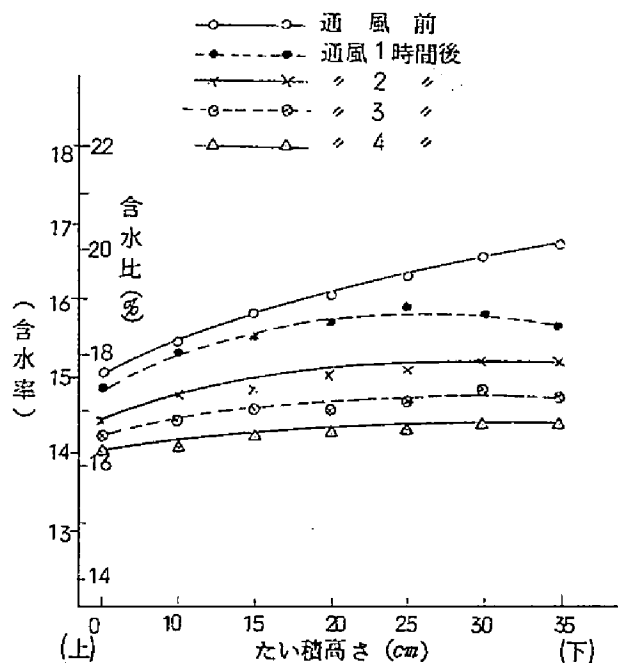
		第1回 排 出	第2回 排 出	第3回 排 出	混合回数	順 位
D ₁	下 層 (%)	16.50			な し	下段のみ
	上 層 (%)	17.54				
	上下水分差(%)	1.04				
D ₂	下 層 (%)	18.26	16.80		1 回	中→下
	上 層 (%)	19.30	17.45			
	上下水分差(%)	1.04	0.65			
D ₃	下 層 (%)	20.22	18.54	17.65	2 回	上→中→下
	上 層 (%)	21.62	19.22	17.83		
	上下水分差(%)	1.40	0.68	0.18		
D ₄	下 層 (%)		22.82	21.02	1 回	上→中
	上 層 (%)		23.55	21.48		
	上下水分差(%)		0.73	0.36		
D ₅	下 層 (%)			22.64	な し	上段のみ
	上 層 (%)			23.29		
	上下水分差(%)			0.65		

(注) 初期含水比 26.86%（含水率 21.17%）

第6節 送風方向変更による乾燥むら防止実験 (実験 15)

(1) 反転送風実験

乾燥むら水分勾配実験 (実験 9) で得られた材料に送風方向を反転せしめ、同じ空気条件 $Q/Wr = 0.095 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec. Kg}$, $T_d = 26 \sim 27^\circ\text{C}$, $H_R = 30\%$ で送風した結果は第 5.15 図のとおりである。反転通風前上下層の含水比は 17.69% と 20.09% (含水率



第 5.15 図 反転通風による乾燥むら防止

15.03%, 16.73%) あったが、高い水分側の乾きは急激で、2時間後 1.1%, 3時間後 0.6% の含水比差となり、乾燥むらの解消に効果があった。低い水分の層は吸湿することなく、4時間運転で約 1.2% の乾燥が進んだが、排気直前の空気が含水比 17.7% のものでも十分乾かす能力をもっていたためである。乾燥むらが著しい時は吸湿する場合も予想される。

(2) 吸湿についての検討

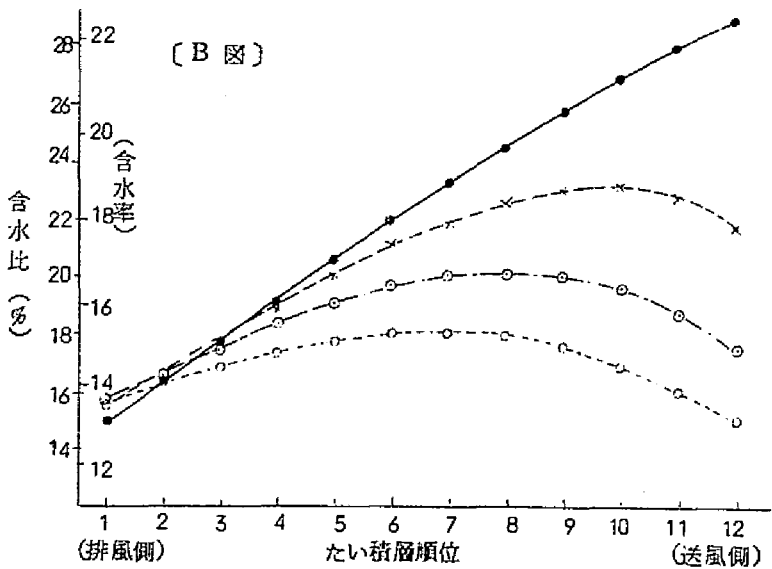
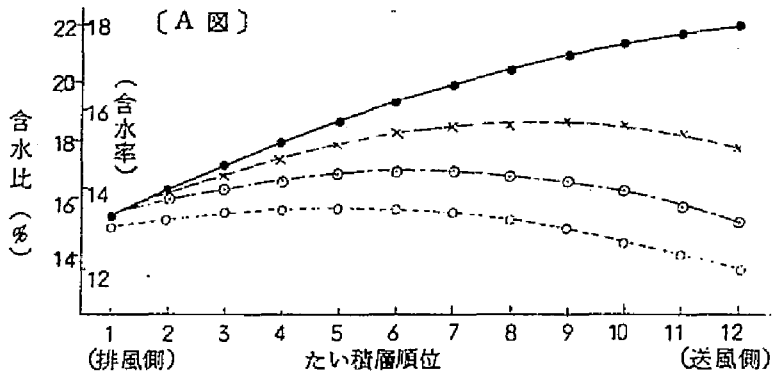
反転通風による時、乾燥むら水分勾配が特に大きい場合や送風量が著しく低い場合など

$$Q/W_f = 0.042 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{kg}$$

$$T_d = 34.1^\circ\text{C}$$

$$H_R = 30\%$$

- 通風前
- ×—× 通風2時間後
- 4
- - -○ 6



第 5. 16 図 反転通風による乾燥むら防止 (計算値)

には吸湿のおそれがある。吸湿は胴われ問題に影響が大きいので注意を要する。

含水比 29.9% と 23.5% のもみに $Q/Wr = 0.042 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{kg}$, $T_d = 34.1^\circ\text{C}$, $H_R = 30\%$ の空気を送り、最下層が含水比 15% に乾いた時、送風方向を反転して同じ条件の空気を送った場合の計算結果は第 5.16 図 A, B のとおりである。送風量は比較的少ない条件であったが、A はむらの発生程度が少なかったため、吸湿しなかった。一方 B はむらが大きかったため $0.3\%/\text{hr}$ の吸湿がみられた。しかし本計算における乾・湿球の温度差と平衡含水比の関係は乾燥過程の値をそのまま使用しており、吸湿過程の平衡含水比は第 5.9 図でみるように若干低い値をとるので、吸湿が生じるとしても、これより小さい値をとることになる。吸湿が発生するかしないかの限界はこの B 計算例附近にあるものと思われる。

第 7 節 摘 要

たい積乾燥では乾燥むらが発生するが、その程度は送風空気温度・湿度・風量穀物比、および初期含水比の影響を受ける。すなわち温度が高いほど、湿度が低いほど、風量穀物比が小さいほど、初期含水比が高いほど乾燥むらは大きい。

乾燥むら減少の手段として温度低下、あるいは湿度上昇を行なうと乾燥速度を低下せしめるが、乾燥時間が長くなる。また風量を多くすると消費動力と熱量増加の問題が生じる。乾燥むら防止法としては発生したむらをどのようにして解消するか、また発生しないように乾かすにはどうすればよいかを考える必要がある。

たい積乾燥中に発生した乾燥むらについてみると、含水比勾配 $0.1\%/\text{cm}$ 以内のものはそのまま放置しておいても水分移行が行なわれない。含水比勾配が極端に高い時（乾・湿もみを層接触せしめた時）には水分移行があり、移行量は温度、水分差、経過時間によってかわり、初期は $V_{qa} = (a + bx)A(WM - DM)$ 、後期は $V_{qb} = C_s x^\alpha A(WM - DM)$ で移行する。

乾・湿もみを混合することによっても減少させうるが、その移行量は含水差と温度によって変化し、 $V = C_s x^\beta (F \cdot WM - J \cdot DM)$ の関係式で示される。しかしもみの平衡水分

には乾燥・吸湿コースがあり，乾・湿もみそれぞれの平衡水分値以上は不可能である。

乾燥過程中にむらを防止する手段としては多段に区分してたい積し，乾燥した下段よりとり出すとむら減少に役立つ。高い含水比のものは3～4段たい積で，乾きむらが若干残るが，下段に移すときシャッタ開閉による自由落下方式をとると，混合がなされるのでむらの心配はほとんどない。また送風方向を変更することにより乾燥むらを減少せしめることが可能であるが，乾燥もみがあまり吸湿しない条件下で使用する必要がある。

第 2 編 多段たい積乾燥機的设计

第 6 章 乾燥機および乾燥施設の具備すべき条件

第 1 節 乾燥機の処理能力⁽⁸⁰⁾

(1) 処理能力決定要素

回分式乾燥機の処理能力はタンク容量と運転回数によってきまるが、除去水分量・乾燥速度・穀物搬出入時間などの影響を受ける。定量づつ処理する乾燥機 1 基について単位時間当たりの処理量 (Y) を示すと次式のとおりである。

$$Y = \frac{W}{W/e + Mw/(dM/d\theta) + W/f + R} \quad (6. 1)$$

W : 乾燥機への投入もみ量 (Kg)

Mw : 除去すべき含水比差 (%)

$dM/d\theta$: 平均乾燥速度 (%/hr)

e : 単位時間当たりの搬入能力 (Kg/hr)

f : 〃 〃 搬出能力 (Kg/hr)

R : 故障、調整などの休止時間 (hr)

乾燥施設では何基かの乾燥機をもち、各基ごとにもみを張込んで運転するが、農家区分・品種区分・予備乾燥の差で $W \cdot Mw$ はさまざまなので、Y はいろんな値を示す。処理能力を高めるには上式の分母を小さくすることで、乾燥機の種類と設備内容並びに集荷もみの実態を検討しなければならない。

(2) 乾燥速度

もみははやく乾かすと胴われを生じる。大型の乾燥施設では委託作業であるため安全をとり、循環式で 1.2 %/hr、静置式で 0.8 %/hr 前後の乾燥速度としている。しかし胴わ

れを生ぜしめることなく平均乾燥速度を高めるには風量の選択（特にたい積乾燥）、送風温度の管理、乾燥途中の休止など使用技術による手段があるので、技術上の問題を明らかにし、かつ関連設備を整えることにより処理能力を向上せしめうる。

（３）基準容量に対する過不足

循環式乾燥機は一定容量のもみを循環せしめながら制限速度に近いはやさで乾かす。規定容量以下の場合（６．１）式の W が減少し、 $dM/d\theta$ ははやくできないので、規準に不足する量に応じて処理能力が低下する。収容量に巾をもたす構造のものもあるが、一定量を超過するものについては通風されず、乾燥の一時停滞が生ずるようになっている。したがって乾燥速度は超過量にほゞ比例して低下するから、容量超過比率 j ($j > 1$) を考慮する必要がある、（６．１）式の乾燥速度は $dM/d\theta \times 1/j$ に修正しなければならない。

静置式でしかも一括運転方式をとる場合（大型乾燥機の乾座上を区分する方法）は何区分かのもみを同時乾燥するので、仕切り数がかわり、容量はあまり変化しない。また各区分穀物ごとの運転方式をとる場合（小型機の組合せ）は集荷量の変動はたい積高の変化となり、平均乾燥速度はほゞ反比例して変化するので、循環式ほどの能率低下とならない。

多段式は３～５段にたい積させ、乾燥した下段より逐次取りだすので、量変化による能率低下が非常に少ない。

（４）乾燥休止時間

（６．１）式の e 、 f は搬出入の能力を示し、乾燥を休止している時間であるから、処理能力を高めるためには、できるだけ大きい値とすることが望ましい。

バケットによる循環式は各基に昇降機をとりつけ、循環用と搬出入用に兼用している。循環量そのものは少量であるが、搬出入による乾燥休止時間の短縮を考えて、４～６ ton/hr の能力をもたしめている。また空気流による循環式は空気の運搬能力が小さいため、乾燥機直上に貯留タンクを設け、事前に専用昇降機で搬入しておき、乾燥機があら直ちに流入できる構造としている。

静置式は１本の昇降機で何基かの乾燥機を支配しているが、過大な負担をかけすぎて乾燥を休止せしめている事例がかなりある。またこの型式は搬入後の均平作業があり、搬出はかき出しによるものが多く、 $e \cdot f$ の値は一般に小さくなっている。搬出を容易ならしめるため“すのこ網”が開閉して瞬時に落下せしめ、搬入は乾燥機上に貯留層を設け、休

止時間を全廃しようとする構造（多段式）のものもある。

搬出入時間の能率低下に及ぼす影響は乾燥速度を高くする型式ほど大きく、乾燥休止率（休止時間／（乾燥時間＋休止時間））を半乾燥もみをあつかう場合についてみると、循環式で0.1～0.15、静置式で0.08～0.18、多段式で0.03をとっている。

第2節 集荷穀物の影響

（1）含水比

乾燥調製施設では天日で予備乾燥したもみを中心にあつかっており、標準含水比を22％にしているが、農家の天日乾燥程度はまちまちで多様なものが入荷する。集荷もみの水分実態事例についてみると第6.1表のとおりで、年によって変化し、天候不良の年は水

第6.1表 集荷もみ含水比の実態

調査地および 年次 含水比区分		滋賀県水口町伴谷			富山県砺波市般若		
		37年	38年	39年	36年	37年	38年
含水比 区分	17.6%以下（乾燥もみ）	30	48	53	22.0	22.7	17.9
	17.7～21.9% (15.1～18.0%)	23.6	10.3	10.5	60.9	66.6	52.8
	22.0～23.5% (18.1～19.0%)	44.2	36.8	29.3	11.3	5.9	16.2
	23.6～25.0% (19.1～20.0%)	23.9	34.5	42.2	4.8	3.6	8.4
	25.1～26.6% (20.1～21.0%)	5.1	13.6	14.5	0.6	1.0	4.1
	26.7 以上 (21.1 以上)	0.2	—	0.2	0.4	0.2	0.6
荷受け点数		602回	851回	806回	519回	476回	631回

（注）1 荷受け点数の比率で示した。数字は％

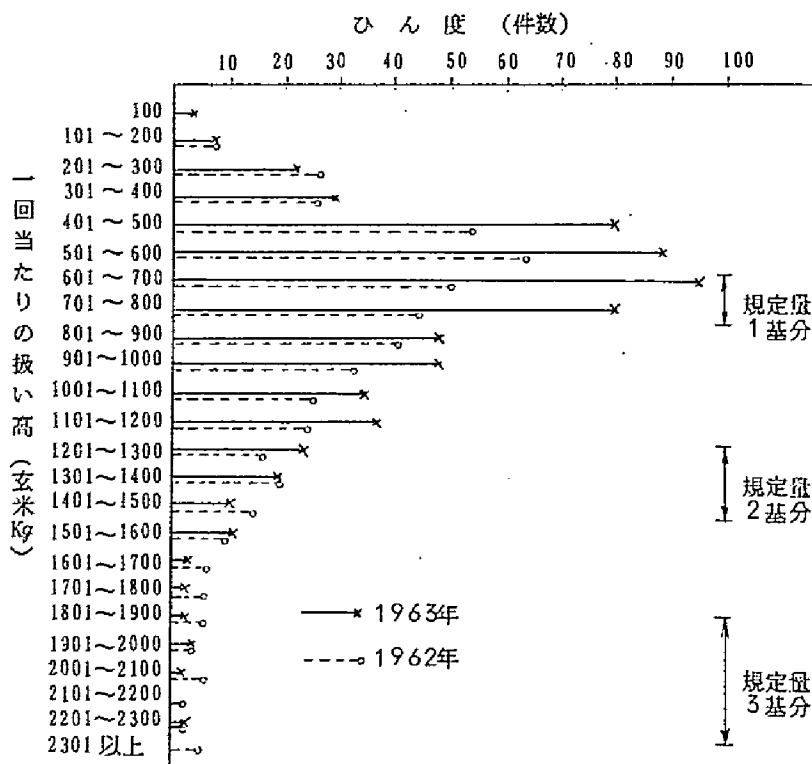
2 括弧内は含水率を示す。

分超過するものが増加する。また最近のように労力不足から刈取り、生脱穀の方法やコンバインが普及すると更に含水比の高いものが集荷されるので、処理能力を著しく低下せしめる。乾燥速度をあげる手段として、また集荷もみの一時貯留設備としてタンク施設が必要である。特に高い含水比のものは貯留中に変質を生じることがあり、貯留の長びくものについては通風設備などを考慮しなければならない。^(81～83)

(2) 集荷量

回分式乾燥機は前述のように容量過不足による能率低下があるので、出荷単位をそろえるよう規定量に過不足するものに対し加算料を課して農家側の協力を求めているものが多い。事例についての調査結果は第6.1図のとおりで、制限を600～750Kg（精玄米量）で示しているが、若干の加算金を課しても基準量に適合するものは29%にすぎず、乾燥機の型式によってはかなりの能率低下となる。

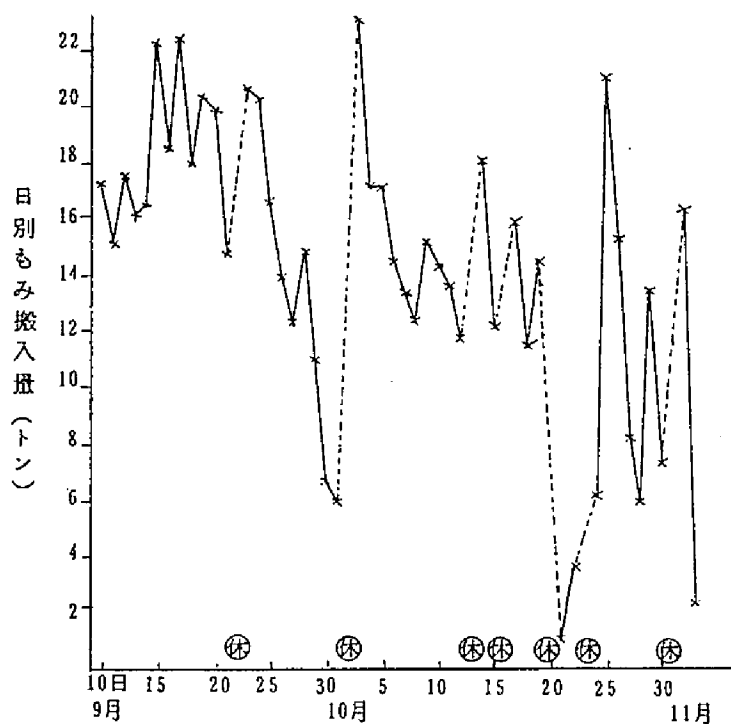
この場合集荷もみには選別差（わら・くずの混入度合）、含水比などの差があり、規制量の範囲に問題が生じるので、選別機の使用や含水比測定法などについて基準を示す必要がある。



第6.1図 入荷もみの小口量ひん度図 — 富山県般若農協 —

(3) 集荷の日変動

日々の集荷もみ量は天候、栽培品種、早・中・晩稲の作付割合の影響をうけ、また時期別格差金をめあてにする早場米地帯は制限期日の直前に殺到する。乾燥機のか動率もこの



第6.2図 日別入荷もみ量 (富山・般若農協1963)

集荷変動に左右され、日別変動を事例でみると第6.2図のとおりである。この例の1日の乾燥機使用回数別ひん度は第6.2表のようになり、半か動日数が全作業日数の45%をしめ、また3交替で連続運転する日が27%もしめている。長時間運転にわたる日も多いので、穀物の貯留設備と運転に労力がかゝらない方式について配慮する必要がある。

第6.2表 乾燥機使用回数別ひん度

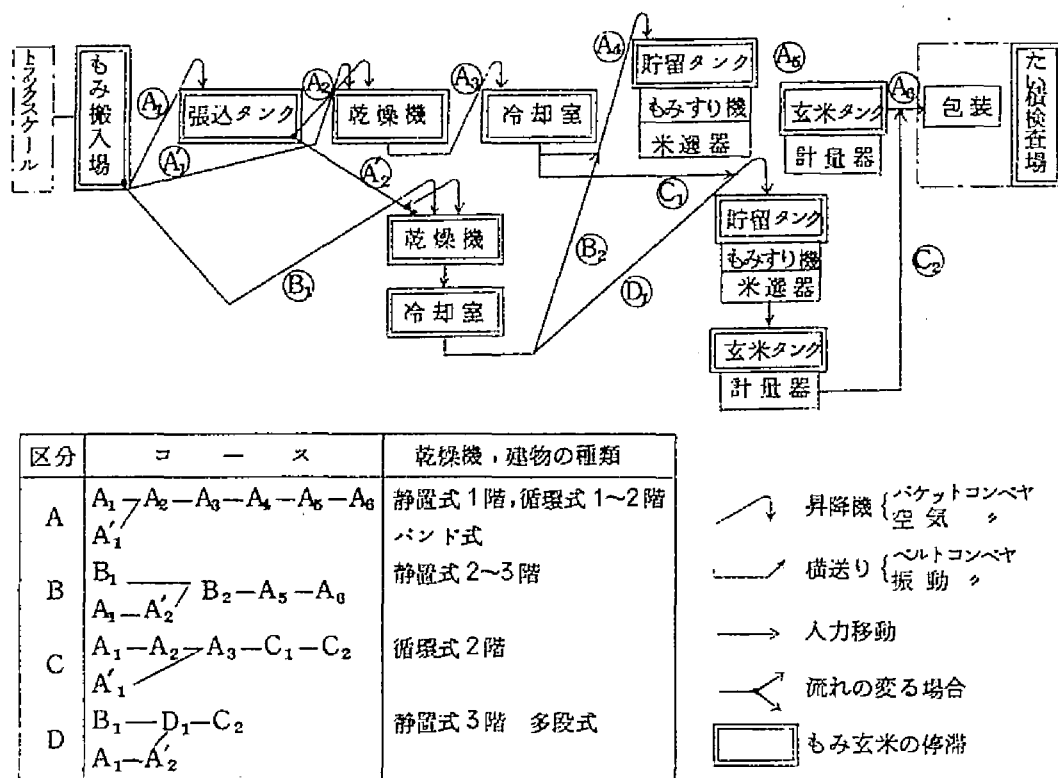
乾燥機使用区分		がい当日数	小 計	比 率
全 か 動	6回	3日	15日	26.8%
	5	12		
通常か動	4	5	16日	28.6
	3	11		
半 か 動	2	15	25日	44.6
	1	10		
合 計		56	56	100.0

- (注) 1. 作業期間中の運転休止日 7日間
2. 乾燥機使用回数は1日当たり回数である。

第3節 大型乾燥調製施設の関連設備

(1) 作業工程^(a)

乾燥調製施設での作業は第6.3図のようにもみ搬入—乾燥—冷却—もみすり—計量—包装—検査の順序で行なわれるので、いずれかの工程で能力不足が生じると施設全体の処理能力に影響する。これらの各作業工程はいずれも一時停滞となっているが、農家区分・品



第6.3図 大型乾燥施設の作業工程

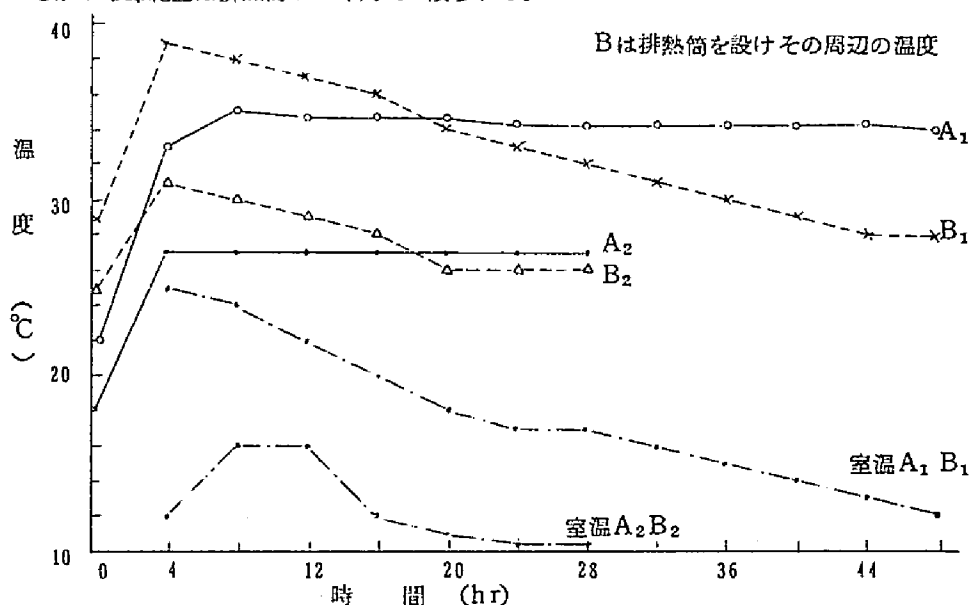
種区分ごとのあつかいによるため、能率低下の大きい原因となっている。また各工程はそれぞれ運搬装置で連結されているが、乾燥機の型式・建物の種類などにより運搬方法も若干異なる。この運搬作業の単純化をはかるには各工程を立体的に配置し、運搬機構を簡略化する手段がのぞましく、事例の中ではDコースが最も単純化されている。

また同一乾燥設備をもちながら、処理実績を著しく低下せしめている例があるが、搬入もみの一時貯留と冷却タンクなど乾燥機をフルに運転せしめるための施設が整備されてい

ない理由による。

(2) 冷却

もみすり時穀温が高いと脱ぶ率が低下し、はだずれ率は著しくなるとの報告があり、⁽⁸⁵⁾ また作業能率に影響し、機械調整もやりにくいとされている。したがって冷却用貯留タンクを設けて冷却につとめているが、第6.4図にみるようにタンク内の温度下降は非常に少なく、1昼夜経過後でもほとんど変化していない。比較実験Bはタンク中央部に金網製の直径25cmの排熱筒を設けたもので、筒から10cmの所で20時間後5℃冷却されているが、冷却範囲は排熱筒のごく周辺に限られる。



第6.4図 冷却タンク内の温度変化

穀物の熱伝導度は比較的に低く（前述）、通風を行わない場合の短時間冷却はむずかしい。乾燥直後の穀物を大型サイロに貯蔵すると1～2月後も温度低下がみられないとの報告があり、通風または穀物を入れかえることによって冷却せしめている。^{(86) (87) (88)}

第4節 施設の利用期間と利用拡大

大型乾燥調製施設の利用はもみの乾燥が中心であり、作業期間は50～90日の範囲で

ある。地帯によって収穫期間の範囲が異なり、また早・中・晩稲の組合せがまちまちで、時期別の入荷変動が著しくあらわれる。各地の施設についてか動日数をみると50日前後にとゞまり、経済収支上赤字となるものが多い。

経済収支をつぐなわせるためには、できるだけ長期にわたる利用が望まれる。しかし農家の作付け品種は収量の高いものに集中し、また早場米地帯では時期別格差金の影響をうけるので、水稻にのみ利用する場合、大巾な利用延長は困難である。遊休期間中麦・牧草・その他農産物乾燥への利用が考えられるが、乾燥機の型式と設備内容によって利用範囲の制限をうけるので、多目的利用が可能な構造とする必要がある。現状は建物利用にとゞまっており、利用拡大方式の検討に迫られている。

第5節 摘要

乾燥機の処理能力を決定する要素は除去水分量、乾燥速度、搬出入のための休止時間、規定容量に対する不足程度とそのひん度である。農家よりの集荷もみは含水比、集荷量の変動があり、また集荷の日変動にもなう、か動率変化があるので、これらの影響をうけない機械の構造や乾燥速度を向上するための設備が必要である。

次に大型施設ではもみ搬入より乾燥・調製・包装・入庫までの流れ作業工程をとるので、各工程間がよく均衡していることが望まれる。特に加熱乾燥もみをタンク内に貯留する時は温度降下があまり期待できないので、通風による冷却設備を必要とする。

乾燥施設の利用は一般にもみ利用のみにとゞまり、50日前後の運転である。したがって経済収支はつぐなっていないが、麦・牧草など多目的利用が可能である乾燥機構では、利用範囲が拡大される。

第 7 章 多段落下型乾燥機

第 1 節 設計上考慮した点

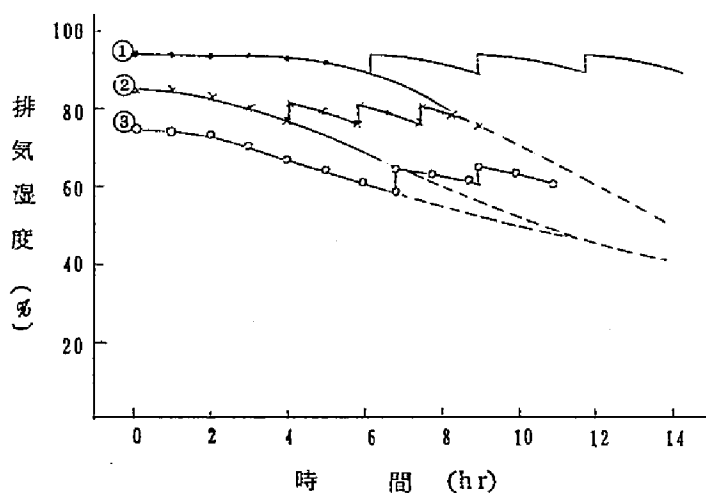
前述の実験的研究ならびに調査結果から多段たい積下層排出方式は穀物の品質向上、処理能力の増大に著しい効果を上げることが判明したので、次に示す事項を重点として乾燥性能の向上をはかった。

(1) 品質について

乾燥むら — 1 段当たり 20 cm 前後のもみを風量が多い条件で乾かし、乾燥した下段から排出すると乾燥むらは少なくなる。また各段では落下時に混合が行なわれるので、乾燥むらは更に低下するが、2 回以上の混合が必要である。

過乾燥防止 — 最下層が規定水分に達した直後に排出すると乾燥厚さが薄いため、静置

	初期含水比	乾球温度	備 考
①	29.9%	34.1°C	湿度 30%
②	23.5	34.1	風量穀物比
③	23.5	27.8	$0.042 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{Kg}$



第 7.1 図 4 段たい積・下段排出乾燥の排気湿度

式におけるような過乾燥は生じない。

胴われ防止 — 乾燥温度・湿度条件を制限以内に設定して乾かすので胴われ発生はない。

また乾燥むら・過乾燥を防いでいるので、乾燥後の吸湿はなく、胴われも生じない。

選別不良もみ — コンバイン収穫もみは選別が悪く、循環式では乾燥塔内につまり、品質を低下せしめることがあるが、開閉シャッタの巾を広くとれば、著しく選別不良のものでもつまらない。

(2) 熱効率について

多段たい積下層排出による乾燥は第7.1図に示すように、排気湿度はのこ歯状を示し、比較的高湿度のものが排出され、熱効率を高めるので、生もみや牧草乾燥に効果をあげる。第7.1図の①の条件下で4段たい積時の平均排気湿度が約92%であるのに対し、1段たい積は約84%で8%の差が生じた。

(3) 処理能力の向上について

搬出入時間 — シャッタの開閉操作のみで穀物を落下排出せしめると搬出時間が著しく短縮できる。また乾燥機運転中に未乾燥のものを最上層に搬入すると、運転休止による能力低下がない。(6.1式参照)

量目変動 — 多段たい積乾燥は同時に多区分の穀物を乾燥するので、集荷もみの量目変動があった場合、多いものと少ないものを組合せて乾燥することができる。排出時は最下層の水分を測定してきめるので、量目によって排出時間の間隔は異なるが、全体の乾燥能力は低下しない。

含水比変動 — 集荷穀物の含水比はかなりの巾にわたって変化する。高い含水比のものを搬入後、低い含水比のものを投入しなければならぬ場合があるが、第5.14図からみるように上段を下に落すまでに相当乾燥し、また通気乾燥時の吸湿は相当高い水分勾配(第5.16図)であり、搬入時の含水比差2~3%では吸湿しない。吸湿のおそれがある場合は最上層への搬入をおくらせる。

(4) その他

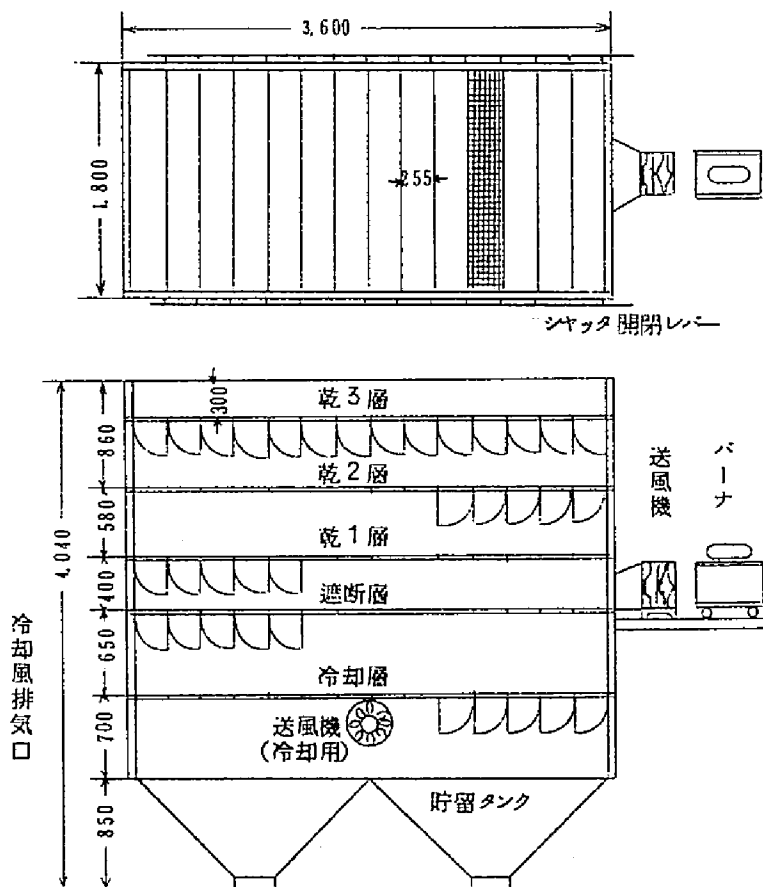
冷却 — 暖かい穀物中に冷風を送ると短時間に冷却することができる。冷却能力は温度差と送風量によるが、本乾燥方式は加熱温度が低いので、短時間の運転でよい。冷却用空

気の湿度が高い場合、乾燥もみを吸湿せしめることがあるので、送風空気の選択に注意する。

多目的利用 — 穀物以外への利用をねらい、牧草乾燥に使用できるようシャッター開閉巾を大きくとる。細断牧草を1層20cm前後積載した場合でも、落下時ブリッジ現象じない開閉巾とする。

第2節 多段落下型の構造⁽⁸⁹⁾

本機は多段たい積の効果を生かし、前節の配慮した点を注意して1号機を設計した。構



第7.2図 多段落下型乾燥機(1号機)

造は第7.2図に示すように乾3, 乾2, 乾1, しや断, 冷却層, 貯蔵タンクおよび送風機部門からなる。加熱空気はしや断層上に送り, 乾1, 乾2, 乾3層にたい積させた穀物を通過して機外に排出される。機体の中央部から送風するので, 送風機および加熱炉は中2階面にすえつける。

乾1層の穀物が乾いたら送風を一時停止し, しや断層シャッタを開き, 次いで乾1層のシャッタを開くと穀物は冷却層に落下する。乾2, 乾3層はそれぞれ下層シャッタをレバ一操作で閉鎖してから順次下に落し, 乾3層には昇降機で未乾燥のものを搬入する。冷却層に落した穀物は暖かいが, 早く冷却せしめようとする時は冷却専用の送風機を運転して穀物中に冷風を通す。

穀物は落下するときシャッタの開き方向で右または左に若干移動し, 両端部のたい積高さが変化するので, 開閉方向を交互にし, 落下後の均平について配慮した。また開閉巾は落下後のおうとつと関連するが, 高低差が2~3cm以内にとゞまるよう25cmの開閉巾とした。

主な寸法は第7.2図に示したが, 乾燥機容量は20cmたい積で10アール分のもみ(約700Kg)が投入できる大きさとし, 1.8m×3.6mを基準値にきめた。

第3節 作業成績(実験16)

3段落下型乾燥機を使用した実験例を示すと第7.1表の通りである。1層に500Kgたい積し, 30°C程度に加熱した空気を風量穀物比 $0.08 \text{ m}^3/\text{sec. Kg} \times 10^{-2}$ 送り, 含水比16.3%目標に乾かした結果である。供試もみの乾燥前含水比が異なり, 送風空気条件にも変化があるので細かい検討はできないが, 次の点が指摘される。

1) 当初より下層にあるAは平均1.78%/hrの乾燥速度で乾いたが, B, Cは初期の乾燥速度が低下するため, 2~4時間延長された。しかしAが排出されて新たに搬入されたDは当初より比較的早い速度で乾き, Aに準じた速さを示した。

2) 本実験で示した乾燥速度と乾燥むら, 過乾燥などによる吸湿の範囲では胴われは生じなかった。

3) 当初より下層におき, 混合操作のなかったAは約1%の含水比差が生じたが, Cは0.4%以下にとゞまった。混合の有無と関係するので, 乾燥を開始する最初の材料は上・

第7.1表 3段落下型乾燥機の作業成績

調査項目 測定時刻 時分	経過時間 hr	外気空気条件			各層温度 °C				排気湿度 %	含水比の推移 (含水率) %					備考
		乾球 温度 °C	湿球 温度 °C	湿度 %	送風 室	1層 通過 後	2層 通過 後	3層 通過 後		乾燥順位					
										A	B	C	D	E	
9 20	0	13.5	10.5	64.5	27.5	15.8	14.0	13.2	70	27.7 (21.7)	27.4 (21.5)	28.5 (22.2)			A排出
10 20	1	14.2	11.2	65.2	28.8	23.8	17.5	15.8	73	24.1 (19.4)	26.6 (21.0)	28.0 (21.9)			
11 20	2	15.5	11.7	58.5	31.0	26.0	22.0	17.5	72	22.1 (18.1)	24.5 (19.7)	26.7 (21.1)			
12 20	3	15.2	11.0	54.6	30.3	26.8	22.6	19.0	63	20.3 (16.9)	23.0 (18.7)	25.2 (20.1)			
13 20	4	15.5	11.0	52.5	30.5	28.0	24.0	20.0	58	18.9 (15.9)	21.5 (17.7)	23.8 (19.2)			
14 20	5	16.1	11.3	50.7	30.8	28.0	25.0	20.4	53	17.8 (15.1)	20.2 (16.8)	22.5 (18.4)			
15 20	6	16.3	11.1	47.7	31.2	29.0	27.0	23.4	48	16.7 (14.3)	19.2 (16.1)	21.4 (17.6)			
15 50	6.5	16.0	10.9	48.1	31.0	28.8	26.4	23.0	45	16.1 (13.9)	18.6 (15.7)	20.8 (17.2)	27.6 (21.6)		
16 50	7.5	16.0	11.0	49.0	30.8	27.8	24.4	17.4	63		17.1 (14.6)	19.3 (16.2)	25.0 (20.0)		B排出
17 50	8.5	15.7	11.0	51.1	30.6	28.8	26.0	21.5	50		16.4 (14.1)	18.6 (15.7)	23.5 (19.0)	28.2 (22.0)	
18 50	9.5	15.5	11.4	55.7	30.8	27.8	22.9	16.5	68			17.2 (14.7)	21.8 (17.9)	25.3 (20.2)	
19 50	10.5	15.5	11.4	55.7	30.8	28.2	24.8	20.5	49			16.3 (14.0)	20.2 (16.8)	23.6 (19.1)	C排出
平均乾燥速度 %/hr										17.8 (12.0)	12.9 (08.8)	11.6 (0.78)			

- (注) (1) 1層当たり500Kgたい積
 (2) 風量穀物比 $0.08 \text{ m}^3/\text{sec.Kg} \times 10^{-2}$
 (3) 括弧内の数値は含水率

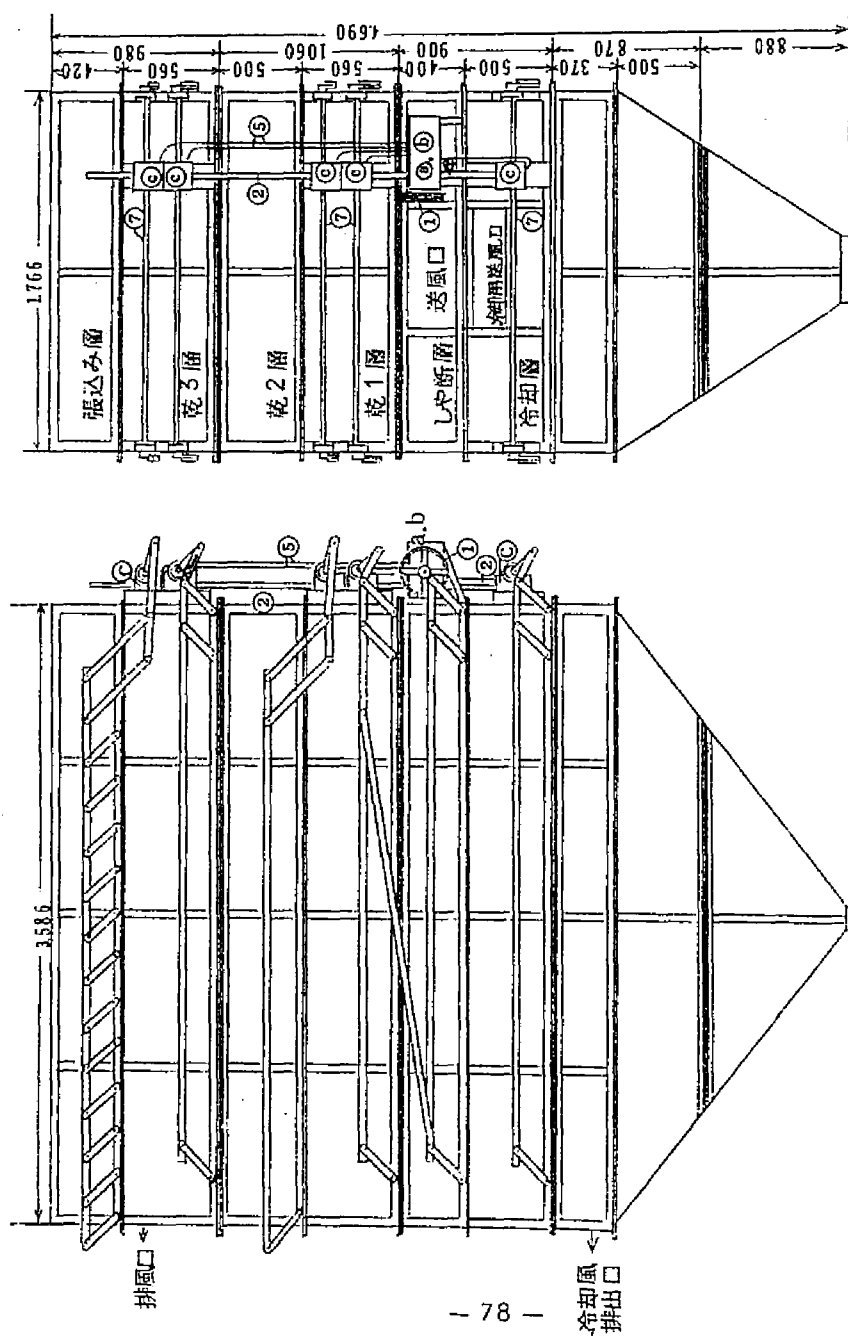
中層にある間に一定時間づゝ乾燥して下層に落下せしめる必要がある。

4) 各層の温度は乾燥が進むにつれて上昇し、上層ほど緩慢である。下層もみを排出するとその上にあった各層のもみ温度は急上昇し、乾燥速度も高まる。

5) 下層もみを排出し、上層に新しい材料をたい積すると排気湿度はかなり高まり、熱効率の向上を示している。本実験の排気湿度はまだ乾燥に利用できる状態であり、熱効率を更に高めるためには風量穀物比を低下せしめる必要がある。

第4節 開閉機構の自動化

手動によるシャッタの開閉は操作の確認をおこたった時、2段分を一諸にする間違いを生じるので、自動的にしかも確実に下段より開閉し、逐次上段を作動せしめる機構が必要

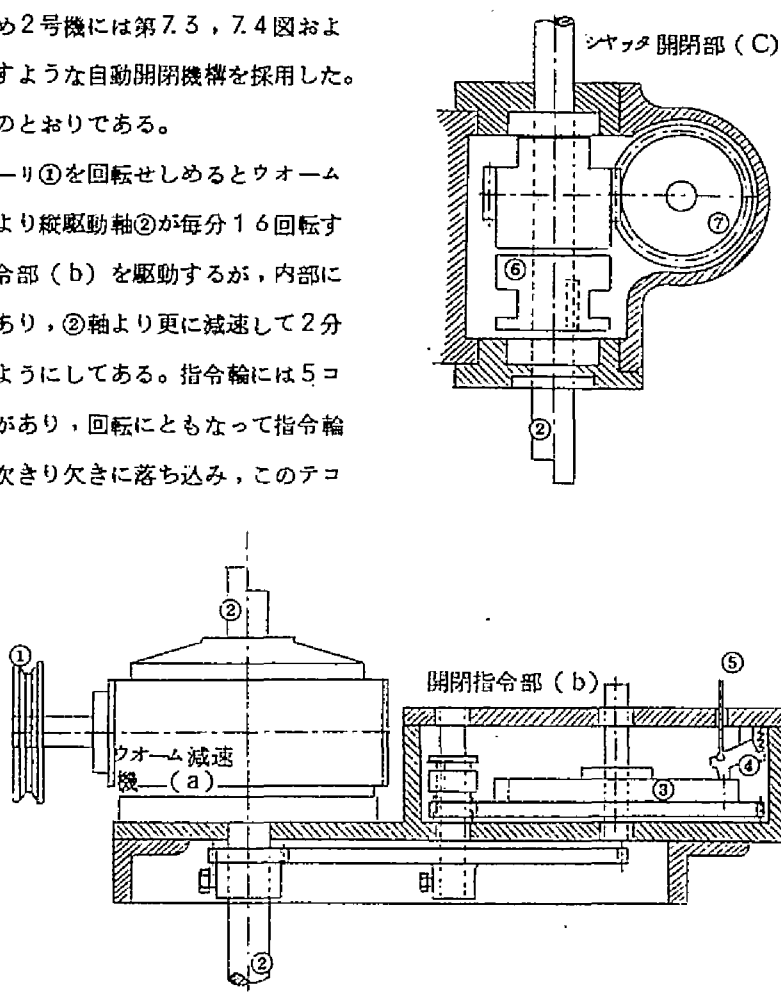


第7.3図 多段階下型乾燥機（自動開閉装置付）

である。このため2号機には第7.3, 7.4図および第7.5図に示すような自動開閉機構を採用した。作動の概要は次のとおりである。

モータでVプーリ①を回転せしめるとウォーム減速機(a)により縦駆動軸②が毎分16回転する。この軸は指令部(b)を駆動するが、内部に作動指令輪③があり、②軸より更に減速して2分間に1回転するようにしてある。指令輪には5コの指令きり欠きがあり、回転とともに指令輪上のテコ④が逐次きり欠きに落ち込み、このテコ

に連結したワイヤローブ⑤がシャッタ開閉部(c)に働く。⑤のワイヤローブが作動するとかみあいクラッチ⑥が上部のねじ歯車とか



第7.4図 シャッタ自動運転機構

みあい、②の回転を開閉操作軸⑦に伝え、シャッタが開く。⑦軸の回転は3回廻り終えた時に⑥のクラッチが切られ、シャッタは閉鎖して停止する。指令輪上には5コのテコがあり、最初冷却屑テコが作動し終ると次の乾1屑としや断屑が同時作動し、順次上屑へと移る。

開閉操作軸⑦を3回転せしめるとシャッタは3回開いて閉じることになるが、これは網上にひっかかった枝こう付もみや牧草のブリッジ現象で落下しない草を振動によってふるい落す目的をもっている。全操作を一巡するに要する時間は2分間である。

(A 図)



(B 図)



第7.5図 多段落下型乾燥機

第5節 張込層および予備乾燥層の増設

(1) 張込層

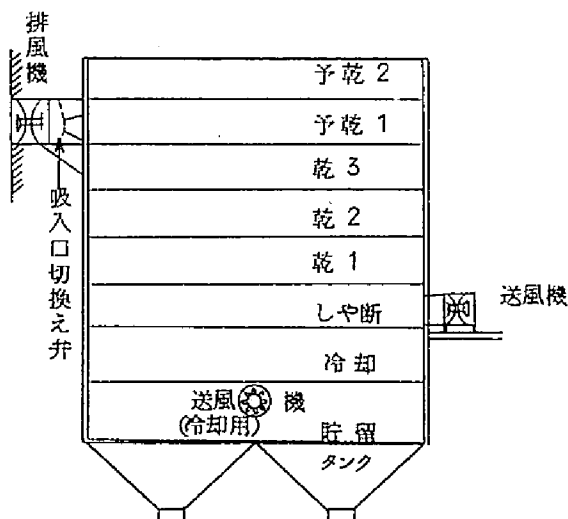
乾る層の穀物を落して後、未乾燥のものを新たに搬入するが、張込みに約20分間を必要とする。この間最上段は乾燥が行なわれず、能率低下となっているので、更に1層を設け乾燥中に張込める方式とした。この張込層増設により乾燥休止時間はシャッタを自動開閉する2分間のみにとゞまるようになった。

大型乾燥施設では最盛期相当数のもみが搬入され、整理やたい積場所に困ることもあり、また夜間運転に対処するため貯留タンクが必要で、この役目としても利用される。

(2) 予備乾燥層の増設

生もみは乾燥に長時間かかり能率を低下せしめるので、乾燥層を増設して能力を高める必要がある。たい積段数を増設すると総たい積高が高くなり、圧力増加にともなう送風量低下問題がある。たい積が高い条件で風量を高めると送風馬力の増加が甚しいので、第7.6図に示すような位置から吸引

によって上下からの通風を行なうこととした。この方法は送風動力をあまり高めることなく乾燥することができ、また上部吸引は搬入時に発生するじんあいを屋外に排出し、衛生的である。この場合上下送風機はそれぞれ静圧、風量が異なるので、送風機特性にもとづき回転数を選定する必要がある。



第7.6図 多段落下型乾燥機
(予乾層の増設)

第6節 摘要

乾燥むらの防止，過乾燥防止，乾燥速度の向上，熱効率の向上，搬出入（乾燥休止）時間の短縮，畚目変動による能率低下の防止，選別不良もみの乾燥，牧草乾燥等への多目的利用，通風による冷却タンクの廃止をねらって多段落下型乾燥機（3段乾燥）を試作した。しかしシャッター開閉操作が手動であるための欠点があったので自動化し，また乾燥休止時間の短縮や最盛期における区分もみの整理用タンクとして張込層を設けた。更に生もみ乾燥の場合，処理能力が著しく低下するので，この対策として予備乾燥層2段を設け，能率を向上せしめるための改造を行なった。

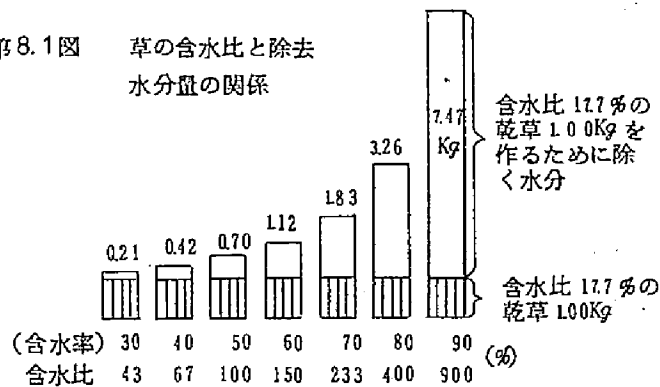
第 8 章 牧草乾燥への利用

第 1 節 牧草の乾燥上の特徴

除去水分量 — 牧草の収穫直後の含水比は 900 % (含水率 90 %) 前後あり、乾燥すべき水分量が非常に多い。含水比 17.7 % の製品に仕上げるために蒸発せしめなければならぬ水分量を示すと第 8.1 図のとおりである。晴天の日、地干しすれば 2 日間で 150 % (含水率 60 %) 程

度の含水比になり、刈取り直後にくらべれば除去すべき水分量が $1/7$ に減少し、機械乾燥する場合の負担が著しく軽減される。(8a) (9)

第 8.1 図 草の含水比と除去水分量の関係



草の性状と圧砕、細断処理 — 莖葉は細くて薄いものほど乾きやすい。性状は草によって種々な様相を呈し、甘藷づる、青刈大豆などの莖は最も乾燥しにくい部類に属し、葉に比較して乾燥差が著しい。太い莖は内部から表面への水分拡散がおそく、能率を低下せしめるので、水分が蒸散しやすい条件を与えてやる必要がある。すなわち細断や圧砕を行なうと非常に乾きやすくなるので、刈取時または刈取直後にカッターやヘイコンディショナを使用する必要がある。

品質 — 含水比の高いものをたい積のまゝ放置すると発酵をおこし、変色、変質ならびに養分を損失せしめる。通風すれば発酵にともなう温度上昇はないが、高温条件下に長時間さらされると変質する。変質防止に対する風量 ($Q \text{ m}^3/\text{sec}$) を材料中の水分 ($W_0 \text{ Kg}$) の比 (風量水分比 Q/W_0) で示し、 $0.001 \text{ m}^3/\text{sec.Kg}$ 以上必要とされている。(8a) (9)

また含水比 43 % (含水率 30 %) 以上のものは 1 晩通風を休むと発酵をおこし、品質が低下するので連続通風の必要がある。

処理能力 — 乾燥能率は 1 回当たり容量、乾燥速度、除去水分量などによってきまる。

牧草の収穫は時期的な制約をうけ、採草量は非常に高く、れんげについてみると2 ton/10a（生草）の収量があり、処理能力の高いものが要求される。乾燥場所は相当な面積を必要とするので、含水比の高い間は天日乾燥を行ない、かなり乾いてから機械乾燥とするものが多い。すなわち67%（含水率40%）以下に乾いたら、軽く圧縮こん包して大量をたい積し、常温通風により長時間かけて乾かす方法がとられている。⁽⁹⁵⁾

常温通風乾燥法は含水比150%（含水率60%）位のものを乾かし上げるに1週間以上もかかり、⁽⁹¹⁾⁽⁹⁶⁾ 水分の多いものを大量処理することはむづかしい。乾燥速度は温度、送風量、初期含水比によってきまるが、草類は相当高温の条件下で乾かしても品質低下はほとんどなく、⁽⁹⁷⁾⁽⁹⁸⁾ 高温処理ほど能率的である。しかし高温乾燥はとかく熱損失をまねきやすいので、乾燥方式とあわせ経済性を考慮する必要がある。

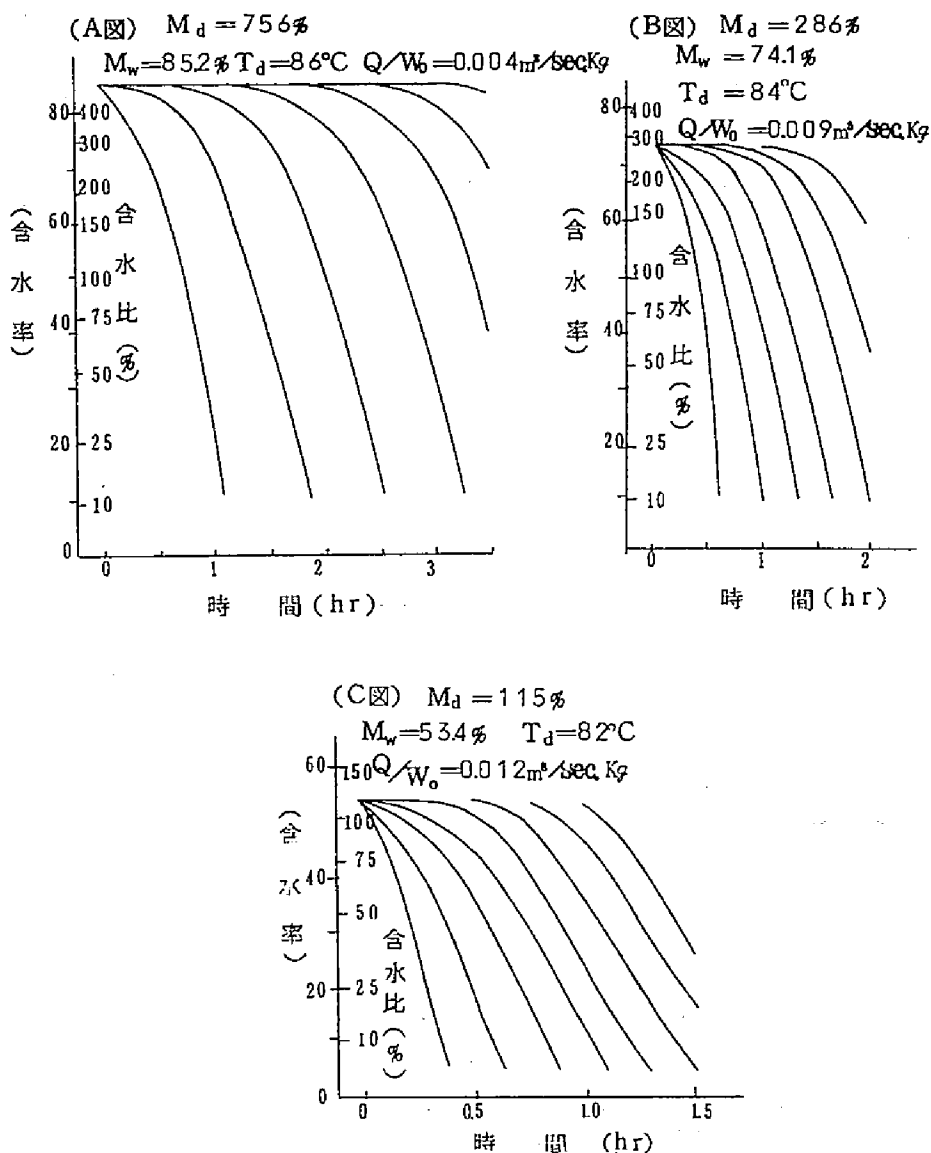
第2節 多段落下型乾燥実験

循環式は構造上牧草乾燥への利用は不可能で、静置式は広い平面にたい積して乾燥するので、牧草その他に利用されるが、乾燥むら・処理能力・運転経費などの問題がある。多段落下型はこれらの欠点を排除する目的で設計したものであり、実験結果は次のとおりである。

ラジノクロバ、オーチャードの混播牧草を3cm前後に切断し、5段にたい積して風量水分比と初期含水比を変化せしめて実験した。結果は第8.2図A、B、Cのとおりで、最上段の乾燥はいずれも停滞状態を示している。これは通風空気が材料中より水分を吸収し、高温となるからで、熱効率が高いことを示している。また初期含水比の乾燥速度に及ぼす影響をみると含水比差470%（含水率11%）で1:2の処理量となった。（第8.2図A、Bの比較、たい積重は乾物重がほぼ同じ条件である。図中 M_d は含水比、 M_w は含水率を示した。）

含水比450%のれんげを4cm前後に切断し、60cm×60cmの多段落下型乾燥実験機に1段当たり7Kg、3段たい積させて、熱風温度を77と60°Cに変化せしめて実験した結果は第8.3図のとおりである。加熱温度差による影響を排出間隔でみると1:1.5の比率となった。

大型乾燥施設に設置している3段式落下型乾燥機（1.8m×3.6m＝6.5m²）を使用し、



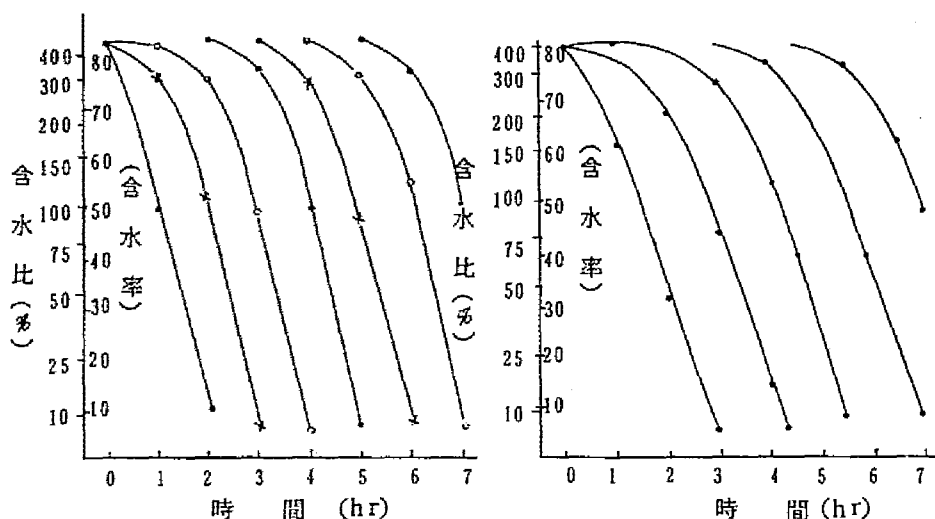
第8.2図 多段たい積による牧草乾燥

含水比 24.7% (含水率 7.13%) のれんげを 4 cm 前後にカットで切断して、1 段当たり 150 Kg (12 cm) ~ 180 Kg (14 cm) たい積させて実験した結果は第 8.1 表のとおりである。この 6.6 m² 用の多段式乾燥機は含水比 23.0% (含水率 7.0%) 見当のれんげを 1.1% 以下に乾燥するのに 100 Kg/hr 余の能率を示し、運転に要する燃料費および電力費は乾燥れんげ 1 Kg 当たり 6 円以内であった。但し燃料は白燈油を使用し、単価 2.8 円/

材料…れんげ4cm切断 たい積段数…3段 1層のたい積高…10cm前後
 1層のたい積草量…7Kg 見かけの密度…208Kg/m³
 初期含水比…450% (含水率81%) 風量水分比0.003m³/sec, Kg

[A図] 熱風温度77°C

[B図] 熱風温度60°C



第8.3図 れんげ多段たい積乾燥

第8.1表 れんげ乾燥成績

乾燥区分	供試重量(Kg)	供水比材料含(%)	乾燥後重量(Kg)	乾比乾燥後含水(%)	歩溜り(%)	負担時間(時間)	一り理時生量間草当のた処(Kg)	乾1Kg経乾燥れたんげの円	備(たい積高さ)考
No. 5	180	247	5650	9.4	3.14	1.8	100.9	5.8	14cm
6	180	247	5635	9.2	3.13	1.7	105.8	5.5	
7	150	247	4730	9.6	3.15	1.4	108.4	5.4	12cm

(注) 1) 負担運転時間は3段たい積なので搬入から排出までの1/3とした

2) 経費は燃料費及び電力費である 3) 単価 燃料28円/Kg 電力4円/KWh

4) 熱風温度77°C前後 5) 見かけの密度196Kg/m³

6) 風量水分比0.0045m³/Kg, sec 7) 供試材料含水率71.3%

Kg, 電力費4円/KWhとして計算した。

含水比247%のれんげ100Kgは刈取直後に換算すると(含水率90%)287Kgに相当するので、10アール分収量2tonを乾かすのに約7時間かかる。多段落下型乾燥機は排気湿度が高く、かなり高い温度で乾かしうるので、処理能力も従来型に比較して非

常に高い。

れんげは牧草中で莖の乾燥がむづかしい材料であり、イタリアンライグラスに比較して1/2以下の乾燥能力であるので、機械乾燥する場合は牧草の選択を考える必要がある。また初期含水率は能率と密接な関係があるので、天日による予備乾燥が大切である。

第3節 摘要

牧草乾燥は大容量のものをあつかい、かつ除去水分量が多く、含水比の高い間は品質を低下せしめやすいなどの特徴がある。またたい積乾燥法による場合、乾燥むらの発生、処理能力が低い、運転経費が高くつくなどの欠点をもっている。

多段落下型乾燥機を利用すれば、乾燥した下段より逐次排出し、上段には未乾燥の材料を搬入して連続的に運転するので、平均乾燥速度は速くなり、かつ乾燥むらも防止できた。また排気される空気は常に高湿状態であるため熱効率が高く、経済的である。現地施設での実験結果によると、含水比24.7%（含水率71.3%）のれんげは7時間運転で10アール分を1基で処理したが、除去水分量（予備乾燥の程度）・乾燥温度・送風量・牧草の種類などを考慮すれば、更に能率を高めることが可能である。

結 言

農産物を経済的にしかも能率的に乾かすには、それぞれの乾燥特性を明らかにし、目的に応じた乾燥法をとる必要がある。通気乾燥法は乾燥能率、経済性などの点ですぐれているため穀物用として広く利用されている。この型式には静置式や循環式などあるが、若干の問題があるので、静置式乾燥機を中心に検討を加えた。

たい積乾燥時における特性についてみると、乾燥は穀物と空気間の水分収支・熱収支であることから、微少厚みにわけて近似計算し、かつ実験を行なった。乾燥を支配するものは送風温度・湿度・風量穀物比・初期含水比・材料の種類などである。能率を高めるために乾燥速度をあげると乾燥むら・胴われ・過乾燥などの品質上の問題が生じる。

乾燥過程で発生したむらは混合操作によって減少せしめられるが、水分移行に時間を要し、かつ均一とならない欠点がある。乾燥時風量穀物比を増大するとむらは減少できるが、消費動力や場所の問題があり、また空気の温度や湿度条件を考慮すると所要時間に難点がある。

胴われは主として乾燥や吸湿速度がはやい時に発生するが、発生量は粒体内部の水分勾配の程度に関係し、収穫もみの損傷状態、乾燥方法、水分領域によって異なるので、胴われの発生しない方法で乾かす必要がある。たい積乾燥をとる時、下層は胴われ発生を限度とする乾燥速度以下となるので、全体の速度が低下する。また規定水分まで乾かそうとすると、下層もみは過乾燥となり品質上好ましくない。この過乾燥もみは水分が低いほど吸湿しやすく、胴われが多発するので、防止についての配慮が必要である。

以上の諸問題に対処するため、たい積層を何区分かにわけてたい積させ、下層の乾いたものより逐次とり出し、未乾燥のものを上層に策入する方式をとると平均乾燥速度を高め、乾燥むら・胴われ・過乾燥を防止する効果があるほか熱効率を向上せしめることができる。したがってこの特徴を生かした多段落下式乾燥機を設計し、改良を加えて実用機に完成せしめた。

従来の乾燥施設はもみのみの利用で、年間50日前後の運転にとどまり、採算がとれぬ悩みがあったが、多段落下式は牧草などに利用できるよう考慮して設計し、適用試験の結果、能率が高く、運転経費も比較的安価で利用価値のあることが判明した。

参 考 文 献

- (1) 河野常盛：米麦貯蔵の理論と実際 河田書房刊（1951. 8） 1～20
- (2) 山下律也；ライスセンタに関する研究（第1報） 富山農試研究報告 1（1966）
122～130
- (3) 小泉武紀；穀物の大規模乾燥貯蔵装置に関する資料（I～IV） 農機誌 25, 26
（1964, 1965） I. 253～, II. 52～, III. 128～, IV. 259～
- (4) 伴敏三；米国における乾燥施設の現状 農機技術情報 4（1966） 13～22
- (5) 新農林社資料室：乾燥機の研究 1 新農林社刊（1963） 1～14
- (6) 関東々山農試農機具部：玄米の乾燥むらが精米に及ぼす影響について 昭和32年度
試験成績書（1958） 211～212
- (7) 篠崎平馬，泉亮太郎；熱及び物質移動 朝倉書店刊（1965） 14～59
- (8) 市村一男，中山元司；穀物の乾燥特性に関する研究（第1報）小麦について 農電研
究所報 1（1960） 77～96
- (9) 市村一男，中山元司；穀類の乾燥特性に関する研究（第2報）粟について 農電研
究所報 2（1961） 109～150
- (10) W. H. C. Simmonds, G. T. Ward and Ewen McEwen;
The Drying of Wheatgrain part 1. The Mechanism of
Drying Trans. Instn. Chem. Engrs. 31（1953） 265～278
- (11) W. H. C. Simmonds, G. T. Ward and Ewen McEwen;
The Drying of Wheatgrain part 2. Through-Drying of
Deep Beds Trans. Instn. Chem. Engrs. 31（1953） 279～287
- (12) 久郷昌夫，向井田健一，渡辺昇；穀類の通気乾燥 北大工学部研究報告 35（1964）
83～106
- (13) A. B. Newman; The Drying of Porous Solids Diffusion
and Surface Emission Equations Trans. Am. Inst. Chem.
Eng. 27（1931） 203～216
- (14) A. B. Newman; The Drying of Porous Solids Diffusion

Calculations Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 27 (1931)
310~333

(15) 小平吉男：物理数学 第2巻 岩波書店刊 (1948) 545~

(16) 化学工学協会；化学工学便覧 丸善 (1965) 542

(17) A. Hustrulid and A. M. Flikke: Theoretical Drying
Curve for Shelled Corn Trans. ASAE 2-1 (1959)
112~114

(18) 平岡正勝；通気乾燥について 化学機械技術 9 (1957) 41~60

(19) S.M. Henderson and P. Pabis: Grain Drying Theory
J. A. E. R. 6-3 (1961) 169~174

(20) P. Pabis and S.M. Henderson: Grain Drying Theory
J. A. E. R. 6-4 (1961) 272~277

(21) 渡辺鉄四郎，清水浩；穀の人工乾燥について 農機誌 12-3.4 (1951)
11~20

(22) 日本麦類研究会；通風乾燥法における乾燥の過程 麦研叢書 38 (1959)
1~48

(23) D. S. Boyce: Grain Moisture and Temperature Changes
with Position and Time During Through Drying J. A. E. R.
10-4 (1965) 333~341

(24) 清久崇磨；木材の乾燥 森北出版刊 (1962) 73~77

(25) E. A. Kazarian and C. W. Hall: Thermal Properties of
Grain Trans. ASAE 8-1 (1965) 33~37

(26) G. A. Haswell: A Note on the Specific Heat of Rice,
Eats and their Products Cereal Chemistry 31 (1965)
341~343

(27) R. W. Disney: The Specific Heat of Some Cereal Grains
Cereal Chemistry 31 (1965) 229~239

(28) 田原迫昭爾；Band Dryer における並流及び通気流が乾燥速度に及ぼす影響
農機学会第24回講演要旨 (1965) 80

(29) 田中孝；穀の水分蒸発潜熱について 滋賀農大大学術報告第1部 8 (1955)

48~50

(30) S. Pabis and S.M. Henderson: Grain Drying Theory
J. A. E. R. 7-1 (1962) 21~26

(31) 佐藤正夫; 籾の胴割機構について 農業および園芸 39-9 (1964)
1421~1422

(32) 長戸一雄, 江幡守衛, 石川雅士; 胴割米の発生に関する研究 日作紀33-1
(1964) 82~89

(33) 亀井三郎; 化学機械の理論と計算 産業図書刊(1951) 398~405

(34) S.M. Henderson: A Basic Concept of Equilibrium
Moisture Agr. Eng. 33 (1952) 29~32

(35) H. J. Thompson and C.K. Shedd: Equilibrium Moisture
and Heat of Vaporization of Shelled Corn and Wheat
Agr. Eng. 35 (1954) 786~788

(36) F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall: Static Versus
Dynamic Moisture Equilibrium in the Drying of Biological
Products J. A. E. R. 10-4 (1965) 308~311

(37) Urte Daiber-Kuhnke: Das Feuchtigkeitsgleichgewicht
von Luft und Getreide bei der Behältertrocknung
Landtech. Forsch. 9-4 (1959) 106~110

(38) 渡辺鉄四郎, 小川浄寿, 福田正光, 吉永昭, 伴敏三; 常温通風乾燥法に関する研
究 関東々山農試研究報告 4 (1953) 39~116

(39) A. Hustrulid; Comparative Drying Rates of Natural
Moist. Remoistened and Frozen Shelled Corn Trans.
ASAE 5-1 (1962) 64~67

(40) 末次勲, 重井不二男; 水稻のコンバイン収穫による開順籾と亀裂籾の発生 農業お
よび園芸 40-2 (1965) 327~329

(41) 福井農試; コンバイン収穫籾の異常籾発生防止に関する試験 昭和40年度農業機
械試験成績 (1966) 29~37

(42) R.E. Arnold and J.R. Lake: Direct, Indirect and
Double Threshing in Herbage Seed Production J. A. E. R.

10-3 (1965) 204~211

(43) R.E. Arnold; Experiments with Rasp Bar Threshing Drums I Some Factors Affecting Performance J.A.E.R. 9-2 (1964) 99~131

(44) K.G. Kolganov; Mechanical Damage to Grain during Threshing J.A.E.R. 3-2 (1958) 179~184

(45) F.S. Mitchell and T.E. Rounthwaite; Resistance of Two Varieties of Wheat to Mechanical Damage by Impact J.A.E.R. 9-4 (1964) 303~306

(46) 田口玄一：実験計画法 上 丸善刊 (1965) 5~36

(47) 山下律也：穀の乾燥に関する研究(第1報) 穂稈の損傷と乾燥特性について 農機誌 28-3 (1966) 162~166

(48) 日本麦類研究会：通風乾燥法における乾燥の過程(第2報) 麦研叢書48 (1960)

(49) 内田俊一，亀井三郎，八田四郎次；化学工学 丸善刊 (1949) 401~403

(50) H. Bungartz; Die künstliche Getreidetrocknung V.D.I. 97 (1955) 363~367

(51) C.W. Hall; Analysis of Air Flow in Grain Drying Agr. Eng. 36 (1955) 247~250

(52) P.J. Lawton: Resistance to Air Flow of Some Common Seeds J.A.E.R. 10-4 (1965) 298~300

(53) 工業技術大系編集委；湿度・水分測定 日刊工業刊 (1960) 111~125

(54) 松田良一，小林一：玄米胴割の発生原因に関する研究 農機学会関西支部報 18 (1963) 21~24

(55) 小林一，松田良一，三輪精博；玄米の胴割発生機構に関する研究(第2報) 農機学会第25回講演要旨(1966) 84

(56) 原城隆：胴割米発生の原因と対策 稲と麦 (1964. 7) 8~12

(57) 富山豊試：胴割米に関する試験 昭和38年度作物試験成績(1964) 32~58

(58) 岡村保，近藤万太郎；玄米が吸湿せし時の膨張の方向と胴割米成生との関係 農学研究 19 (1932) 143~152

(59) 岡村保；胴割米に関する研究 農学研究 27 (1937) 166~194

- 60) 反田嘉博；米の吸水に関する組織学的研究 日作紀31 (1962) 167~170
- 61) 四国農試機械化研究室；暖地における水稻の刈取適期の判定に関する試験 昭和40年度試験成績 (1966) 1~8
- 62) 狩野秀男；脱穀と籾摺 農業機械化協会刊 (1956) 88
- 63) 重井不二男，桑野茂三；通風乾燥機による籾の乾燥について 福井農試60周年記念論文集 (1960) 121~130
- 64) 居垣千尋；籾の人工乾燥における速度と品質に関する研究 農機誌17-1 (1955) 30~33
- 65) 田中孝；籾の乾燥における胴割れについて 滋賀農大大学術報告第1部 7 (1955) 36~39
- 66) 伴敏三；穀物の移動乾燥法に関する研究 昭和40年度農機研研究成績 (1966) 116~121
- 67) 押田勇雄；蒸発・乾燥 河出書房刊 (1950) 27
- 68) 田中孝，大久保秀雄；籾の赤外線乾燥について (第1報) 農機誌16-1.2 (1954) 24~28
- 69) 農機研；火力乾燥法に関する研究 昭和39年度研究成績 (1965) 452~461
- 70) 山下律也，児玉正道，藤井光彦；早期栽培籾の乾燥について 農機学会関西支部報8 (1958) 50~53
- 71) 桐栄良三；乾燥装置 日刊工業刊 (1966) 18
- 72) 川村登，山下律也，山本功；籾の乾燥特性と品質に及ぼす影響 農機学会関西支部報23 (1966) 21~23
- 73) O. R. Kunze and C. W. Hall: Relative Humidity Changes that Cause Brown Rice to Crack Trans. ASAE 8-3 (1966) 396~399, 405
- 74) 川村登，山下律也，笈田昭；籾のたれ積乾燥と乾燥むらについて 農機学会関西支部報22 (1965) 16~18
- 75) 富山農試；富山県における通風乾燥機の利用実態 昭和33年度農機具試験成績 (1959) 1~5
- 76) 広島農試；生籾からの乾燥方法および乾燥後の処理が籾品質に及ぼす影響 昭和37年度農機具試験成績 (1963) 20~24

- ⑦⑦ 山下律也，笈田昭；穀の水分移行について 農機誌27-4 (1966) 261~265
- ⑦⑧ 八田四郎次；化学工学概論 共立出版刊 (1947) 54
- ⑦⑨ 農事試験機具部；水分の異なる穀を混合放置したときの含水率変化 昭和36年度試験成績 (1961) 120~122
- ⑧① 山下律也；大規模乾燥調製施設の研究(第1報) 農機誌27-4 (1966) 267~271
- ⑧② 北陸農試作物部；生穀の保存方法に関する研究 昭和39年度試験成績 (1965) 1~47
- ⑧③ Anton G. Meiering und Fred W. Bakker Arkema；
Kurzzeitlagerung von feuchten Handelsgetreide unter
Luftabschluss, Landtech. Forsch. 15-6 (1965) 192~200
- ⑧④ 日本麦類研究会；穀物の通気貯蔵に関する研究 麦研叢書70 (1962) 1~23
- ⑧⑤ 富山農試；共同乾燥調製施設に関する調査研究 富山農試報告 特2 (1962) 11
- ⑧⑥ 広島農試；乾燥直後の穀すり，冷却が品質に及ぼす影響 農機学会第23回講演要旨 (1964) 21~23
- ⑧⑦ W. F. Williamson；Temperature Changes in Grain Dried
and Stored on Farms J. A. E. R. 9-4 (1964) 32~47
- ⑧⑧ G. A. Hohner and D. B. Brooker；An Analog of Grain
Cooling by Cross-Flow Aeration in Tall Structures
Trans. ASAE 8 (1965) 56~59
- ⑧⑨ W. E. McCune, N. K. Person and J. W. Soreson；
Conditioned Air Storage of Grain Trans. ASAE 6-3
(1963) 186~189
- ⑨① 山下律也；共同乾燥調製施設に関する研究(賞概) 農機誌26-1 (1963) 4
- ⑨② 山下律也，猪原明成，河田久吉，松山善之助；ライスセンタに関する研究(第2報)
富山農試研究報告 1 (1966) 131~139
- ⑨③ 渡辺鉄四郎；通風乾燥機の使い方 新農林社刊 (1962) 152~172
- ⑨④ 横山倅和夫，土居原一三，高野信男，北村方男；ヘイコンディショナーによる牧草の
乾燥促進効果に関する試験 農機学会北海道支部報 6 (1959) 59~65
- ⑨⑤ 岡村俊民，高崎康夫，伊藤道秋；乾燥調製に関する研究 第1報 農機誌 26-2

(1963) 114~120

⑨4 渡辺鉄四郎, 小川浄寿, 福田正光, 宮沢昭, 伴敏三, 金津豊彦; 常温通風乾燥機に関する研究Ⅲ 関東々山農試研究報告12 (1959) 115~145

⑨5 岡村俊民, 高崎康夫; 簞子型常温通風乾燥機に関する試験結果について 農機誌 26-3 (1964) 201~206

⑨6 高橋俊行; 赤クローバの常温通風乾燥に関する研究 農機誌21-3 (1959) 111~114

⑨7 菊地修二; 乾燥とその利用 畜産の研究19-1 (1965) 185~189

⑨8 亀高正夫; グラスミールとその利用 畜産の研究19-1 (1965) 179~184

⑨9 永原太郎, 堤忠一; 乾燥法による米の水分定量 食糧研究所研究報告 14 (1959) 77~82